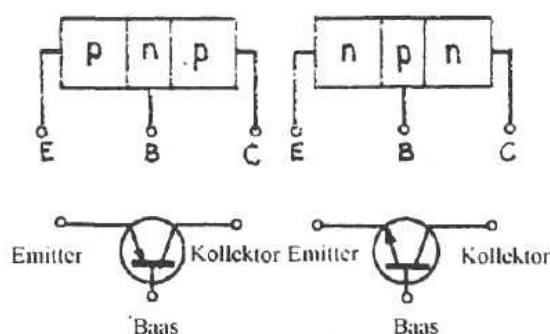


6. TRANSISTORID

Bipolar Junction Transistor(BJT)

6.1. Transistori ehitus.

Transistoriks ehk täpsemalt bipolaartransistoriks nimetatakse pooljuhtseadist, mida kasutatakse elektriliste pingete ja voolude võimendamiseks ja genereerimiseks ning ka kontaktivaba lülitina nii nõrk- kui tugevvooluahelates. See on praegu kõige enam kasutatavaks pooljuhtseadiseks. Transistor on pooljuhtseadis, millel on kaks p-n-siiret. Tal on kolm osa, millest kaks äärmist on ühesuguse juhtivusega, keskmine aga erineva juhtivusega. Vastavalt sellele, millist juhtivust omab keskmine osa, on võimalik valmistada kaht liiki transistore p-n-p ja n-p-n (vt. joonis 6.1).



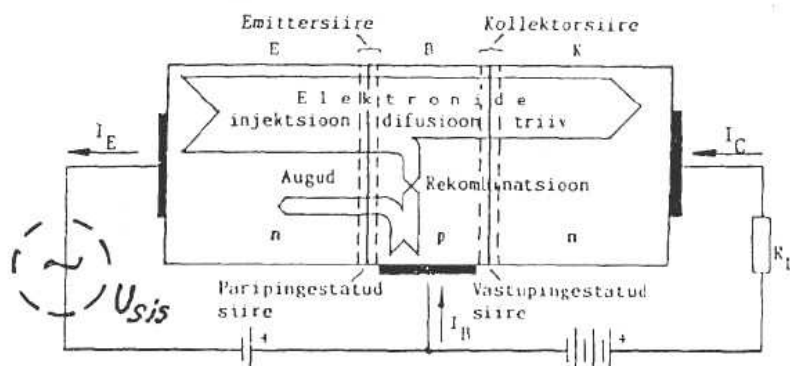
JOONIS 6.1.

Transistori keskmist osa nimetatakse baasiks, üht äärmist emitteriks ja teist kollektoriks. Transistori tingmärgid sõltuvalt tüübist on toodud samuti joonisel 6.1. Kristall, kus on tekitatud vastavad tsoonid, varustatakse väljaviikudega ja paigutatakse hermeetilisse kesta. Emitteri ja baasi vahelist siiret nimetatakse emittersiirdeks, baasi ja kollektori vahelist siiret aga kollektorsiirdeks. Kuigi transistori konstruktsioon on skemaatiliselt sümmeetriline, ei ole ta seda elektriliselt, st. kollektor ja emitter ei ole vahetatavad. Erinevus on selles, et emitteri juhtivus peab olema tunduvalt suurem kui kollektoril. See saavutatakse lisandite erinevate kontsentratsioonidega transistori eri osades.

6.2. Transistori tööpõhimõte

Transistori ehitusest tulenevalt võime seda vaadelda ka kahe omavahel baasis kokkuühendatud dioodina. Seepärast on ka transistoris toimuvad protsessid mõnevõrra samased dioodis toimuvatega. Transistor lülitatakse alati tööle nii, et emittersiire pingestatakse päripingega ja kollektorsiire vastupingega (joonis 6.2). See reegel kehtib transistori tüübist sõltumata, kuid kuna eri tüüpi transistoridel on vastavate osade juhtivused vastupidised, siis on toitepingete polaarsuses erinevus, sõltuvalt sellest, kas n-p-n või p-n-p transistore.

Vaatleme enamlevinud n-p-n transistori tööd. Kuna emittersiire on pingestatud avasuunas siis läbib teda tugev päri vool, mida kõige väiksema pinge muutus mõjutab tugevalt, kuna siirde päritakistus on väike. Nagu juba mainitud, töötab kollektorsiire vastupingežiimis, mistõttu ayatud emitteri korral läbib kollektorsiiret väga väike vastuvool.



JOONIS 6.2.

Nagu juba eespool mainitud, on transistori valmistamisel silmas peetud seda, et emitteris oleks laengukandjaid rohkem kui baasis. Sellega on garanteeritud, et asetleidva laengukandjate reekombinatsiooni tõttu ei tekiks laengukandjate likvideerumist. Kui kollektorahel ei ole pingestatud, siis liiguvad kõik emitterist tulnud elektronid baasi elektroodile ja esineb tugev baasivool. Kui aga üheaegselt on pingestatud nii emitter- kui kollektorssiire, muutub voolude jagunemine transistoris tunduvalt. Oluline on see, et baas kujundatakse võimalikult kitsana. Elektriväli mõjub ainult siirde tsoonides ja baasi muus osas elektriväli puudub. Seetõttu emitterist baasi tulnud elektronid hakkavad seal liikuma difusiooni toimele. Kuna baas on väga kitsas, siis enamik elektrone, liikudes difusiooni toimele, ei jõua baasielektroodini, vaid kollektorsiidesse. Kollektorsiidres aga mõjub elektriväli, mis suunab sinna sattunud elektronid kollektorisse. Seega jaguneb emittervool baasi- ja kollektorvooluks. Sealjuures on baasivool kollektorvoolust tunduvalt väiksem (tavaliselt 1... 8%):

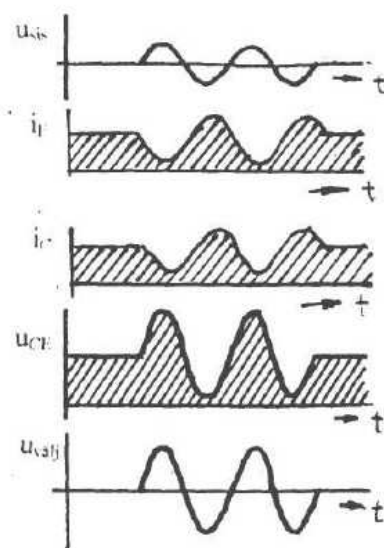
$$I_E = I_C + I_B; I_B \ll I_C; I_E \approx I_C$$

Täpsemalt, $I_K = A \cdot I_E$, kus A on vooluülekanalitegur ehk staatiline voolu-võimendustegur, A väärtus on vahemikus 0,92 ... 0,99.

Kui rakendada emitteri ja baasi vahele lisaks alalispingele ka vahelduv-sisendpinge, siis tekitavad väikesed sisendpinge muutused küllalt suuri emittervoolu muutusi (avasuuunareziim). Peaaegu samasuured voolumuutused tekitavad ka kollektorvoolus. Kollektorringi vastusuunareziimist tingituna on selle ahela takistus suur ja võime sinna lülitada koormustakistuse, mis peaaegu ei mõjuta kollektorringi tööd. Kollektorringis oleval koormustakistil aga tekitavad kollektorvoolu muutuste tulemusena pingemuutused ja järelikult võime takistilt saada väljundpinge. Kirjeldatud protsessi illustreerivad joonisel 6.3 toodud graafikud.

$$U_{VÄLJ} = \Delta I \cdot R_C \gg U_{SIS} = \Delta I_E r_{SIS};$$

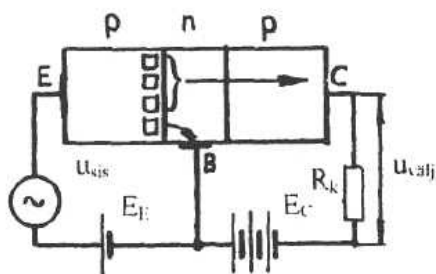
$$K = \frac{U_{välj}}{U_{sis}} \approx \frac{R_K}{r_{sis}}$$



JOONIS 6.3.

Kokkuvõtlikult võime transistori tööpõhimõtte kohta öelda järgmist: väikese takistusega emitterringis sisendpinge poolt tekitatud voolumuutused kanduvad peaaegu samasuurtena üle suure takistusega kollektorringi ning kollektorringi lülitatud koormustakistilt saamegi võimendatud väljundpinge. Seega võime transistori vaadelda ka kui takistuse muundit, millest on tuletatud ka selle nimetus. (TRANSfer resISTOR).

p-n-p tüüpi transistori võimendav toime on põhimõtteliselt sama kui n-p-n transistoril. Erinevuseks on vaid see, et emitterist baasi liikuvateks laengukandjateks on elektronide asemel augud, p-n-p transistoriga lülitus on toodud joonisel 6.4.



JOONIS 6.4.

6.3. Transistori kolm lülitust.

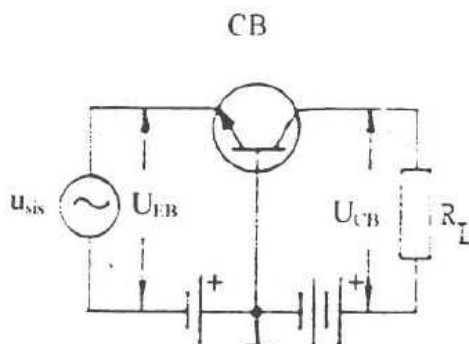
Kuna transistoril on kolm elektroodi, siis töötades võimendina, millel on neli klemmi (2 sisend- ja 2 väljundklemmi), toiteklemme arvestamata, peab üks elektrood olema ühine sisendile ja väljundile.

Sõltuvalt sellest, milline on ühine elektrood, on olemas ühise baasiga (CB - Common Base), ühise emitteriga (CE - Common Emitter) ja ühise kollektoriga (CC - Common Collector) lülitused. Kuna enamasti ühine elektrood maandatakse, siis nimetatakse neid lülitusi mõnikord ka maandatud baasiga, maandatud emitteriga ja maandatud kollektoriga lülitusteks. Tingituna sellest, et erinevate lülituste omadused on erinevad, vaatleme neid eraldi täpsemalt. Kõikide nende lülituste vaatlemisel tuleb mees pidada, et lülituses olevad alalispingeallikad on signaalile s.o. vahelduv-komponendile väga väikeseks takistuseks (praktiliselt lühiseks).

6.3.1. Ühise baasiga lülitis.

Ühise baasiga lülituses (joonis 6.5) toimub transistori tuürimine emittervooluga, st. $I_{sis} = I_E$:

$$U_{sis} = U_{EB}, U_{VALJ} = U_{CB} \text{ ja } I_{VALJ} = I_C$$



JOONIS 6.5

Võrreldes teiste lülitustega saadakse suur pingevõimendus ja väikesed mitte-lineaarmoonutused. Puuduseks on väike sisendtakistus (avasuunas olev emittersiirde takistus) ja suur väljundtakistus. Mainitud puuduse tõttu on raskusi kirjeldatud lülituses võimendusastmete omavahelise sidestamisega, sest järgneva võimendusastme väikese takistusega sisend koormab tugevalt eelneva võimendusastme väljundit.

Kui sisendpinge muutub ΔU_{sis} võrra, siis emittervool ΔI_E võrra ning vastavalt muutvad ka teised voolud. Kooskõlas eelmises punktis toodud valemiga võime kirjutada:

$$I_E + \Delta I_E = I_C + \Delta I_C + I_B + \Delta I_B.$$

Siit järeldub, et

$$\Delta I_E = \Delta I_C + \Delta I_B$$

Sisend- ja väljundvoolude muutuste suhet nimetatakse vooluvõimendusteguriks:

$$K_{iB} = \alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} = \frac{dI_C}{dI_E}.$$

Kuna baasivoolu muutus on kollektorvoolu muutusega võrreldes suhteliselt väike, siis $\alpha = 0,92 \dots 0,99$. Eeltoodud avaldisest lähtudes võime avaldada ka baasivoolu muutuse:

$$\Delta I_B = \Delta I_E - \Delta I_C, I_C = \alpha \cdot \Delta I_E,$$

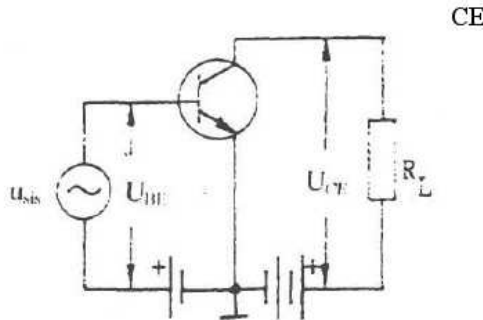
järelikult

$$\Delta I_B = \Delta I_E - \alpha \cdot \Delta I_E = \Delta I_E (1 - \alpha)$$

6.3.2. Ühise emitteriga lülitus

Ühise emitteriga lülitus on kõige enamlevinud lülituseks (joonis 6.6). Ka siin on väljundvooluks kollektorivool, kuid tüürimine toimub baasivooluga. Seega $I_{\text{sis}} = I_B$, $I_{\text{välj}} = I_C$; $U_{\text{sis}} = U_{BE}$ ja $U_{\text{välj}} = U_{CE}$. Kuna baasivool on emittervoolust palju väiksem, on vastavalt suurem ka sisendtakistus. Lülitus annab suurima võimsusvõimenduse, sest üheaegselt esineb siin nii voolu- kui ka pingevõimendus. Astmeid on omavahel kergem sobitada kui eelnevas lülitus, sest siin on sisendtakistus suurem ja väljundtakistus väiksem.

JOONIS 6.6.



Kuna sisendvooluks on ühise emitteriga lülitus baasivool, siis muutub ka vooluvõimendusteguri avaldis:

$$K_{iE} = \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{dI_C}{dI_B}.$$

Avaldame β väärtuse α kaudu:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_E(1-\alpha)} = \frac{\alpha}{1-\alpha}.$$

Saadud valemist näeme, et mida suurem on α , seda suuremaks kujuneb ka β .

6.3.3. Ühise kollektoriga lülitus

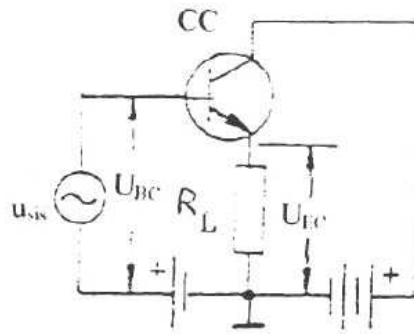
Ühise kollektoriga lülitus pingevõimendust ei arenda. $I_{\text{sis}} = I_E$, $I_{\text{välj}} = I_C$, $U_{\text{sis}} = U_{BC}$ ja $U_{\text{välj}} = U_{CE}$.

Kuna väljundpinge võetakse emitteriahelast ja on väga lähedane sisendpingega, siis nimetatakse teda ka emitterjärguriks. Vooluvõimendus on küllalt suur, kuna emittervool on tunduvalt baasivoolust suurem. Suure vooluvõimenduse tõttu annab lülitus ka võimsusvõimendust. Lülituse eripäraks on suur sisend- ja väike väljundtakistus, mis võimaldab seda kasutada sobitusastmena.

Avaldame nüüd ühise kollektoriga lülituse vooluvõimendusteguri:

$$K_{iC} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_C} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_E(1-\alpha)} = \frac{1}{1-\alpha}.$$

Kuna aga α on lähedane ühele, siis analoogiliselt eelmise lülitusega $K_{iC} \approx \beta$.



JOONIS 6.7.

Vooluvõimendustegurid α ja β on põhilisteks transistori võimendusomadusi iseloomustavateks parameetriteks. Edaspidi selgub, et nn. h-prameetrite süsteemis $\alpha = h_{21B}$ ja $\beta = h_{21E}$. Lihtsustatud parameetrite mõõtmisel, mida võimaldavad tavaliselt testrid, mõõdetakse neid tegureid alalisvoolu režiimis, eeldades, et $\alpha = A$. Sellest lihtsustusest tulenev viga jääb tavaliselt lubatavatesse piiridesse, kuid see meetod ei arvesta, et võimendusteguri väärtus sõltub ka tööpunkti.

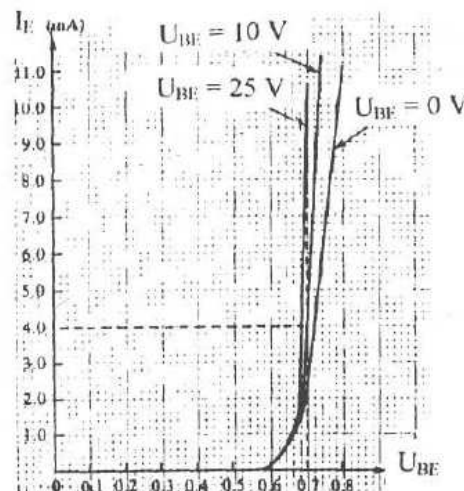
6.4. Transistori staatilised tunnusjooned

Transistoride omaduste iseloomustamiseks kasutatakse staatilisi tunnusjooni. Staatilisteks nimetatakse neid tunnusjooni sellepärast, et neil kajastub korraga kahe muutuva suuruse sõltuvus kolmanda muutumatul režiimil. Kuna kolmas muutuja võib reaalselt samuti muutuda, kajastatakse see tunnusjoonte sarjadena, kus antakse tunnusjooned konstantseks võetud muutja eri väärtustel. Kuna transistori kasutatakse kolmes erineva omadustega lülituses on ka eri lülituste tunnusjooned erinevad.

Tähtsamateks tunnusjoonteks on: väljundtunnusjoon (*output characteristics*) $I_{VALJ} = f(U_{VALJ})$, kui $I_{SIS} = \text{const}$ ja sisendtunnusjoon (*input characteristics*) $I_{SIS} = f(U_{SIS})$, kui $U_{VALJ} = \text{const}$. Harvemini kasutatakse päriülekande- ehk voolu-ülekanDETUNNUSJOONT $I_{VALJ} = f(I_{SIS})$, kui $U_{VALJ} = \text{const}$ ja veelgi harvemini vastu-ülekanDE- ehk tagasisidetunnusjoont $U_{SIS} = f(U_{VALJ})$, kui $I_{SIS} = \text{const}$.

6.4.1. CB lülituse tunnusjooned.

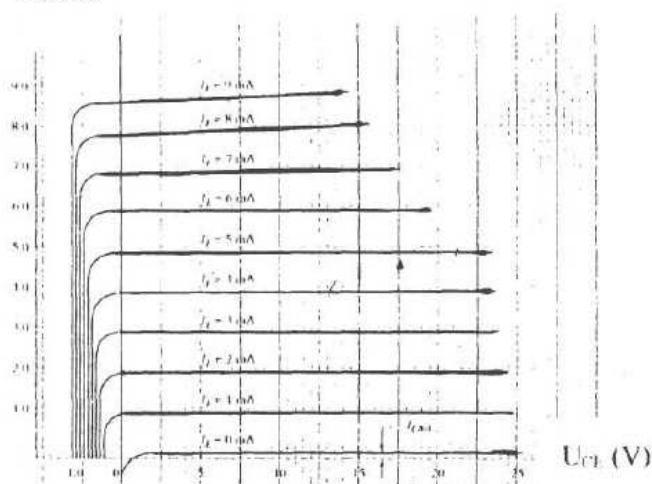
Ühise baasiga lülituse sisendtunnusjooneks on $I_E = f(U_{EB})$, kui $U_{CB} = \text{const}$, mille üldkuju on toodud joonisel 6.8. Nagu on loogiline, on need tunnusjooned väga sarnased diodi pärisuunatunnusjoonega. Kollektorpinge suurendamisel suureneb voolu tõus. Sealjuures on maksimaalne emittervool määratud enamuslaengukandjate kontsentratsiooniga emitteris. Nõrkade voolude piirkonnas on tunnusjooned tugevalt mittelineaarsed.



JOONIS 6.8.

Ühise baasiga lülituse väljundtunnusjooned $I_c = f(U_{CB})$, kui $I_E = \text{const}$ on toodud joonisel 6.9. Kollektorvoolu suurus on määratud emitterist baasi liikuvate laengu-kandjate hulgaga. Kui $I_E = 0$, on väljundtunnusjoon sisuliselt kui ka kujult sarnane diodi vastusuunatunnusjoonega. Kollektorvoolu põhjustajaks on baasi vähemus-laengukandjad ja seetõttu on arusaadav, et kui $I_E = 0$, on kollektorvool väga nõrk. Niipea kui tekib emittervool, s.t. kui emitterist tuleb baasi vähemuslaengukandjaid, suureneb kollektorvool kohe.

$I_c(\text{mA})$



JOONIS 6.9.

Kollektori ja baasi vahelise pinge polaarsuse muutumisel hakkavad laengu-kandjad liikuma kollektorist baasi ja neile vastu liiguvad emitterist tulnud laengukandjad. Sel puhul moodustub kollektorvool nende voolude summana ja vool lakkab mõne kümnendiku voldi kollektorsiirde päripingel. Väljundtunnussarjale võib olla kantud ka lubatava kollektorkao $P_{c \text{ MAX}}$ joon.

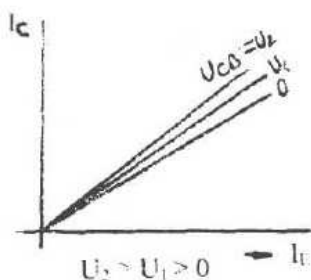
Vooluülekanetunnusjooneks ühise baasiga lülituses on $I_c = f(I_E)$, kui $U_{CB} = \text{const}$ (joonis 6.10). Nagu teame, on kollektorvool määratud kollektori algvoolu ja emitterilt kollektorile liikuvate laengukandjate voolusummana: $I_c = A \cdot I_E + I_{c0}$,

kus I_{c0} on kollektori algvool. olukorras, kus $I_E = 0$;

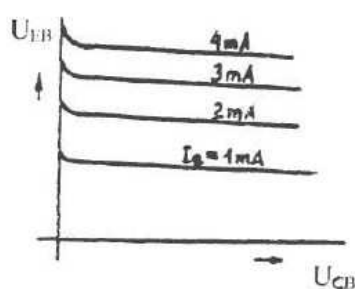
I_E : - emittervool;

A - staatiline vooluvõimendustegur ($A=0,9 \dots 0,99$).

Kuigi A väärtus sõltub mõnevõrra emittervoolust, on vooluülekanete-tunnusjooned praktiliselt siiski lineaarsed ja ka määratavad väljundtunnusjoontelt.



JOONIS 6.10.

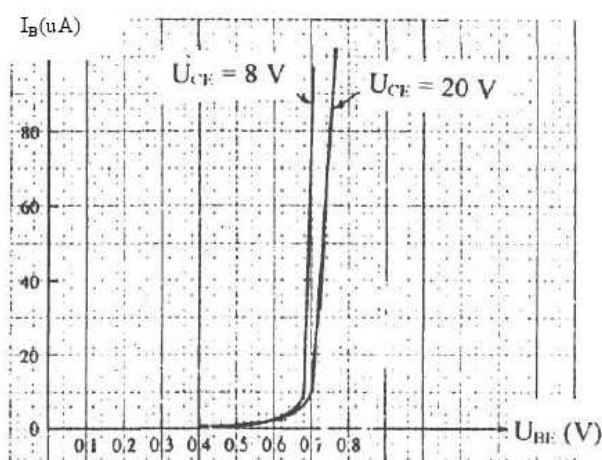


JOONIS 6.11.

Tagasisidetunnusjoon kajastab väljundpinge mõju sisendpingele $U_{EB} = f(U_{CB})$, kui $I_E = \text{const}$ (joonis 6.11). Kuna toodud tunnusjooned on üsna lamedad, on väljundpinge mõju sisendpingele üsna väike ja sellest tuleneb ka nende tunnusjoonte vähene kasutatavus.

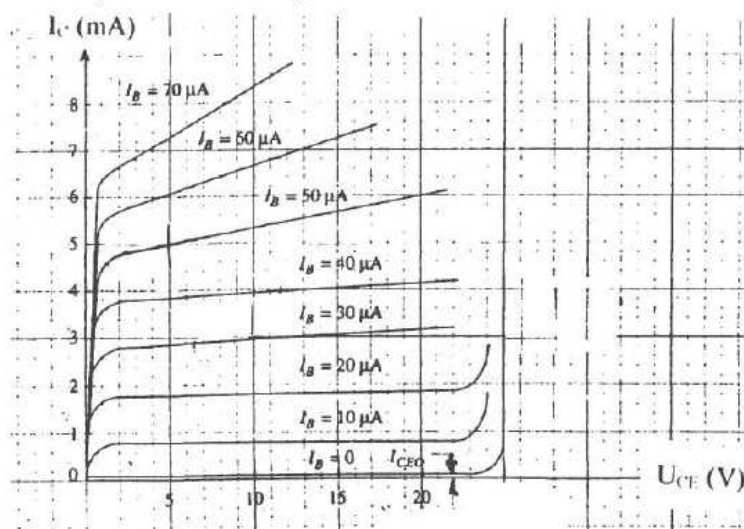
6.4.2. CE lülituse tunnusjooned.

Ühise emitteriga lülitusel on olemas kõik needsamad tunnusjooned mis ühise baasiga lülituselgi. Tunnusjoonte kujud on ainult mõnevõrra erinevad ja muidugi on teised ka telgedel toodud suurused. Sisendtunnusjoon CE lülituse puhul kujutab funktsiooni $I_B = f(U_{EB})$, kui $U_{CE} = \text{const}$ (joonis 6.12). Voolu nõrgenemine kollektori- ja emitterivahelise pinge suurenemisel on seletatav voolu jagunemisega baasi ja kollektori vahel: $I_C = I_E - I_B$. Samuti on näha, et kollektorpinge mõju baasivoolule on üsna väike.



JOONIS 6.12.

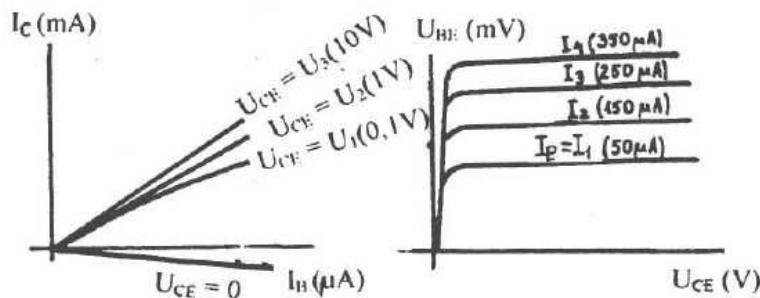
Väljundtunnusjoon CE lülituse puhul kujutab funktsiooni $I_C = f(U_{CE})$, kui $I_B = \text{const}$. Kuna ühise emitteriga lülituses antakse baasile väike negatiivne pinge, siis tekib vool kollektoris alles siis, kui kollektor saab baasist negatiivsemaks (kollektori ja emitteri vaheline pinge ületab baasi ja emitteri vahelise pinge). Kirjeldatud tunnusjooned on toodud joonisel 6.13.



JOONIS 6.13.

Võrreldes CB lülitusega tunnusjoontega on vaadeldaval juhul üksikud tunnusjooned vähemlineaarsed ja suurema tõusuga abstsissitelje suhtes (kollektorvool sõltub rohkem kollektori pingest). See on seletatav sellega, et kollektori ja emitteri vaheline pinge ei toimi siin üksnes kollektorsiidle, vaid osaliselt ka emittersiidle. Sellega on ka seletatav väiksem väljundtakistus kui CB lülitusel.

Vooluülekandetunnusjoon $I_c = f(I_B)$, kui $U_{CE} = \text{const}$, on toodud joonisel 6.14. Nagu graafikult näha, on väiksematel kollektorpingetel vooluülekandetunnusjoon mittelineaarne. Mittelineaarsus on seletatav kollektorsiidle kitsenemisega väikestel kollektorpingetel. Kollektorsiidle kitsenemine on samaväärne baasi laienemisega, millega aga kaasneb staatilise võimendusteguri A vähenemine ja vooluülekande mittelineaarsus.



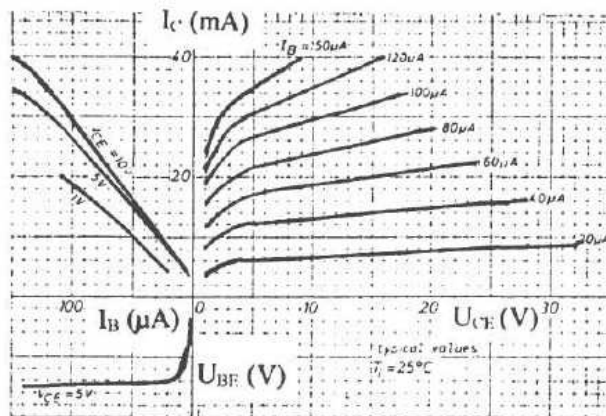
JOONIS 6.14.

JOONIS 6.15

Tagasisidetunnusjoonelt $U_{BE} = f(U_{CE})$, kui $I_B = \text{const}$ (joonis 6.15), on näha, et väikeste kollektorpingete puhul on mõju baasipinge tugev. See on seletatav jällegi baasi väikese päripingega emitteri suhtes ja seetõttu sulgub kollektorsiidle alles siis, kui

$$|U_{CE}| > |U_{BE}|$$

Kõige enamkasutatavad CE lülituse tunnusjooned antakse sageli käsiraamatutes ühistel telgedel, nagu on näitena toodud joonisel 6.16.

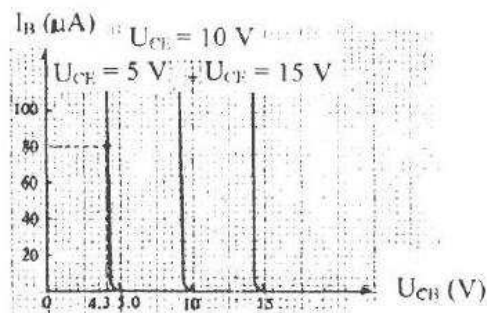


JOONIS 6.16.

6.4.3.CC lülituse tunnusjooned.

Ühise kollektoriga lülituse suurim tunnusjoonte erinevus senivaadelduist tuleneb sellest, et sisendtunnusjooned ei ole enam p-n-siidle pärisuunatud tunnusjooned, kuna $U_{sis} = U_{BE}$.

Sellest tulenevalt on nüüd sisendtunnusjooneks $I_B = f(U_{BC})$, kui $U_{CE} = \text{const}$. Vastavad sisendtunnusjooned on toodud joonisel 6.17.



JOONIS 6.17.

Sellele lülitusele on iseloomulik, et $U_{BE} = U_{CE} - U_{CB}$, millest tulenevalt on baasivoolu tekkimine võimalik ainult siis, kui baasi ja kollektori vaheline pinge on vastavalt (0,5...0,7V) kollektori ja emitteri vahelisest pingest väiksem. Kui need pinged võrdsustuvad, muutub sisendvool nulliks, kuna emittersiirdele ei tule enam pärisuuna-pinget.

Seevastu väljundtunnusjoontena võime kasutada CE lülituse väljundtunnusjooni. Ainsaks erinevuseks on see, et väljundvooluks on nüüd kollektorvoolu asemel emitterivool, mis erineb viimasest ainult mõne protsendi võrra.