

12. TRANSISTORE BIPOLARRAREN SEINALE HANDIKO EREDUAK

Aurreko ikasgaietan, ikusi dugu transistore bipolarren polarizazioan lau gune edo modu posible daudela. Zein gunetan lan egiten ari den jakiteko, tentsioei begiratu behar diegu. Modurik garrantzitsuenetan –aktiboan- erabiltzeko ekuazio eta zirkuitu baliokideak lortu bagenituen ere, komeniko litzateke ekuazio multzo orokor bat lortzea, aplikatutako edozein tentsiorekin (edozein lan-gunetan) aplikatzeko.

Tentsioak finkatu orduko, bi eredu ditugu korranteak jakiteko:

- Ebers-Mollen eredu, klasikoa.
- Gummel-Poonen eredu, simulazio-programetan erabiliena (Spice programan, adibidez).

Ikasgai honetan, Ebers-Mollen eredu analizatuko da.

Lortuko ditugun ekuazioek edozein polarizaziorako ezaugarritatzen digute BJTa eta haien adierazpen grafikoa BJTaren ezaugarri-kurbak dira. Guk teoriako analisisia egingo badugu ere, fabrikatzaileen *Datu Liburuetako* kurba esperimentalekin lan egingo dugu normalean.

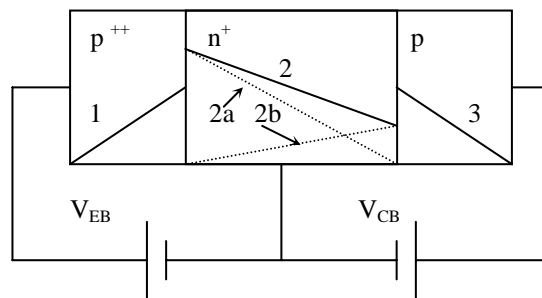
Azkenean, Ebers-Mollen ereduak kontuan hartzen ez dituen idealarekiko bi desbideratze (edo bigarren mailako efektu) analizatuko dira: Early efektua eta β -ren I_C -rekiko menpekotasuna.

12.1 Ebers-Mollen ereduak

12.1.1 EREDUAREN DEDUKZIOA

Pnp motako BJTa analizatuko dugu. Oso hurbil dauden bi pn junturaz eratzen da hori eta bi junturen lotura elektrikoa oso laburra den basearen bidez egiten da.

Demagun transistorea bi tentsio positiboz polarizatzen dugula: $V_{EB} > 0$, $V_{CB} > 0$. Orduan, transistorea asetasunean dago. Baseko profila bitan deskonposatuz, juntura bakoitzeko tentsioak profilean duen eragina agerian geratzen da (ikus 12.1 Irudia). Profilen —eta fluxuen— gainezarpena aplikagarria denez, deskonposaketaren ikuspuntua esanguratsua da.



12.1 Irudia. Pnp transistorearen profila asetasunean

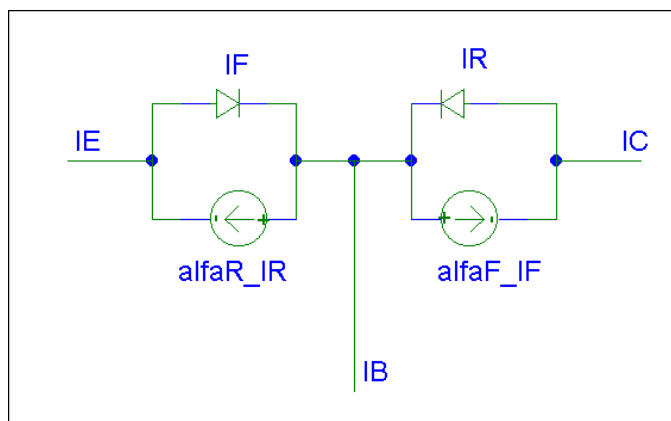
Igorleko korronteak bi osagai ditu:

- 1.- I_F juntura horretako polarizazioa dela-eta agertzen den korrontea da $(1+2a)$.
- 2.- Kolektoreko juntura oso hurbil dagoelako agertzen den korrontea da $(2b)$. Hau da, kolektoreko junturan sortutako korrontea I_R bada, igorleko junturaraino heldu eta igorlerra pasatzen den korronte horren zatia: $\alpha_R \cdot I_R$.

Gauza bera esan dezakegu **kolektoreko korronteari buruz**. Bi osagai daude:

- 1.- I_R juntura horretan polarizazioa dela-eta agertzen den korrontearen osagaia da $(2b+3)$.
- 2.- Igorleko junturatik iristen den korrontea $(2a)$ da; hau da, kolektorerraino heltzen den I_F igorleko junturako korrontearen zatia: $\alpha_F \cdot I_F$.

Hala, 12.2 Irudiko zirkuitu baliokidea ulertzeko moduan gaude:



12.2 Irudia. Ebers-Mollen zirkuitu baliokidea (pnp transistorearentzat)

- 1.- Agertzen diren diodoak BJTaren junturak dira.
- 2.- Menpeko bi korrante-sorgailuak bi junturen arteko loturak dira.
- 3.- α parametroak, transmisioaren adierazleak dira. Azpi-indizeei dagokienez, F (Forward) transmisio zuzena da, eta R (Reverse), alderantzizko transmisioa.
- 4.- $\alpha_F < 1$ eta $\alpha_R < 1$, juntura batean sortutako korrantea ez baita beste junturaraino osorik heltzen (aurreko ikasgaien ikusi genuenez, badira transistore efektuan parte hartzen ez duten osagaiak, eta baseko birkonbinaketa, nahiz eta txikia izan, ez da hutsa).

Orduan, korronteak honela geratzen dira:

$$I_E = I_F - \alpha_R \cdot I_R$$

$$I_C = I_R - \alpha_F \cdot I_F$$

$$I_B = -[I_E + I_C] = -[I_F - \alpha_R \cdot I_R + I_R - \alpha_F \cdot I_F] = -(1 - \alpha_F) \cdot I_F - (1 - \alpha_R) \cdot I_R$$

Non:

$$I_F = I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right) \quad \text{eta} \quad I_R = I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

I_{ES} eta I_{CS} igorleko eta kolektoreko junturen asetasuneko korronteak dira (bakoitza bere bi osagaiekin).

Formulak trinkotuz, pnp transistoreen Ebers-Mollen ereduaren ohiko adierazpena lortzen da:

$$I_E = I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right) - \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_C = I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right) - \alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_B = (\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right) + (\alpha_R - 1) \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

Eredu horrek edozein polarizaziopean balio du.

α_F , α_R , I_{ES} eta I_{CS} dopaketaren eta geometriaren menpe daude.

Baina, lau aldagai horien artean, $\alpha_F \cdot I_{ES} = \alpha_R \cdot I_{CS} \equiv I_S$ betetzen da betiere, non I_S transistorearen asetasuneko korronea baita (definizioz). Aurreko ekuazioa **elkarrekikotasunaren erlazioa** da.

Elkarrekikotasunaren erlazioa kontuan hartzen badugu, hiru parametro behar ditugu BJT dispositiboa ezagutzeko: α_R , α_F eta I_S , adibidez.

Zergatik betetzen da? Batea berbera delako bi junturentzat.

$\alpha_F I_{ES}$ igorleko junturako tentsioak baseko profilararen bidez kolektoreko junturan eragiten duen korronea da; hau da, I_{ES} -ren baseko osagaitik kolektoreko junturaraino heltzen dena. Era berean, $\alpha_R I_{CS}$ da baseari dagokion kolektoreko asetasuneko korronearen osagaia ($\gamma_C I_{CS}$). Elkarrekikotasunaren erlazioak islatzen duenez, baseko analisi hori berdina da bi junturentzat.

$$I_{ES} = I_{ESB} + I_{ESE} \quad (\text{eta } I_{ESB} = \gamma_E \cdot I_{ES} = I_{satB})$$

$$I_{CS} = I_{CSB} + I_{CSC} \quad (\text{eta } I_{CSB} = \gamma_C \cdot I_{CS} = I_{satB})$$

$$\alpha_T \cdot (\gamma_C \cdot I_{CS}) = \alpha_T \cdot (\gamma_E \cdot I_{ES}) = \alpha_T \cdot (I_{satB}) = \alpha_T \cdot \frac{q \cdot D_{mB} \cdot n_i^2}{W \cdot N_B} \cdot \text{Azalera} = I_S$$

I_S korroneak bi junturek konpartitzen duten osagaia adierazten du eta dispositiboaren oinarritzko konstantea da.

Korronteen eta tentsioen zeinuak aldatuz lortzen ditugu npn transistoreen ekuazioak. I_S beti positiboa bada ere, kontuan hartu behar da I_E , I_C eta I_B korronteen zeinua, transistore motaren eta polarizazioaren menpe daudela.

Basea oso luzea balitz ($W_B \gg L_{urrien}$), basea zeharkatuko lukeen korrontea oso txikia litzateke ($\alpha_R, \alpha_F \ll 1$, I_{TB} oso handia litzatekeelako). Orduan, beraz, transistore efektua desagertuko litzateke. Kasu horretan ere, Ebers-Mollen ereduak baliagarria izaten jarraitzen du, eta terminal komun bat duten bi diodo independente dituen eredura garamatza.

12.1.2 $\alpha_F, \alpha_R, I_{ES}$ ETA I_{CS} PARAMETROEN KALKULU ESPERIMENTALA

Ebers-Mollen ereduan agertzen diren parametroak kanpoko parametrotzat har ditzakegu, esperimentalki neur baitaitezke.

Hala, pnp batean $V_{CB} = 0$ behartzen badugu (bi terminal horiek zirkuitulaburtuz):

$$I_R = I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{0}{V_T}\right) - 1 \right) = 0$$

$$I_E = I_F - \alpha_R \cdot 0 = I_F \Rightarrow I_E = I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_C = 0 - \alpha_F \cdot I_F = -\alpha_F \cdot I_F = -\alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$\text{eta, beraz, } \alpha_F = \left. -\frac{I_C}{I_E} \right|_{V_{CB}=0} \quad \left(\text{aktiboko } \alpha = -\frac{I_C - I_{C0}}{I_E - 0} \right|_{akt}$$

α_F , beraz, base komuneko korronte-irabazia da, irteera zirkuitulaburrean dagoenean. I_{ES} igorleko junturako asetasuneko korrontea da, irteera (base-kolektore juntura) zirkuitulaburrean badago.

Era berean,

$$I_C \Big|_{V_{EB}=0} = I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right) \quad \text{eta} \quad \alpha_R = \left. -\frac{I_E}{I_C} \right|_{V_{EB}=0}$$

Ondorioz, α_R base komuneko alderantzizko korronte-irabazia da, sarrera zirkuitulaburrean dagoenean. I_{CS} kolektoreko junturako asetasuneko korrontea da, baldin eta sarrera (base-igorle juntura) zirkuitulaburrean badago.

12.1.3 EBERS-MOLLEN EKUAZIOEN BESTE ADIERAZPEN BAT (pnp batekin)

$$I_E = I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right) - \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right) \Rightarrow$$

$$I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right) = I_E + \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_C = I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right) - \alpha_F \cdot \left[I_E + \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right) \right] \Rightarrow$$

$$I_C = -\alpha_F \cdot I_E + (1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{CS} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$\text{Era berean, } I_E = -\alpha_R \cdot I_C + (1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{ES} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

I_{C0} eta I_{E0} korronteen definizioa gogora ekarriz:

$$I_{CB0} = I_{C0} \equiv I_C \Big|_{V_{CB}=0} = (1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{CS} \cdot (0 - 1) \Rightarrow I_{C0} = -(1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{CS}$$

$$I_{E0} = -(1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{ES}$$

$$I_C = -\alpha_F \cdot I_E - I_{C0} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_E = -\alpha_R \cdot I_C - I_{E0} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

Ebers-Mollen beste adierazpen bat dira.

Tentsioetan eta korronteetan, zeinuak kontuan izan behar ditugu, eta, npn transistoreen kasuan, korronte eta tentsio guztien zeinuak aldatu (azkenean, tentsioen kasuan azpi-indizeak trukatu, besterik ez da egin behar).

α_R eta α_F erabili beharrean, β_R eta β_F (**igorle komuneko** konfigurazioko irabaziak) erabil daitezke:

$$\beta_F \equiv \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} \quad \beta_R \equiv \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R}$$

Bestalde:

$$\alpha_F \cdot I_{E0} = -\alpha_F \cdot (1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{ES} = -(1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_S$$

$$\alpha_R \cdot I_{C0} = -\alpha_F \cdot (1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_{CS} = -(1 - \alpha_F \cdot \alpha_R) \cdot I_S$$

Eta, beraz, $\alpha_F \cdot I_{E0} = \alpha_R \cdot I_{C0}$

Elkarrekikotasunaren erlazioa, zirkuitu irekiko korronteekin ere betetzen da.

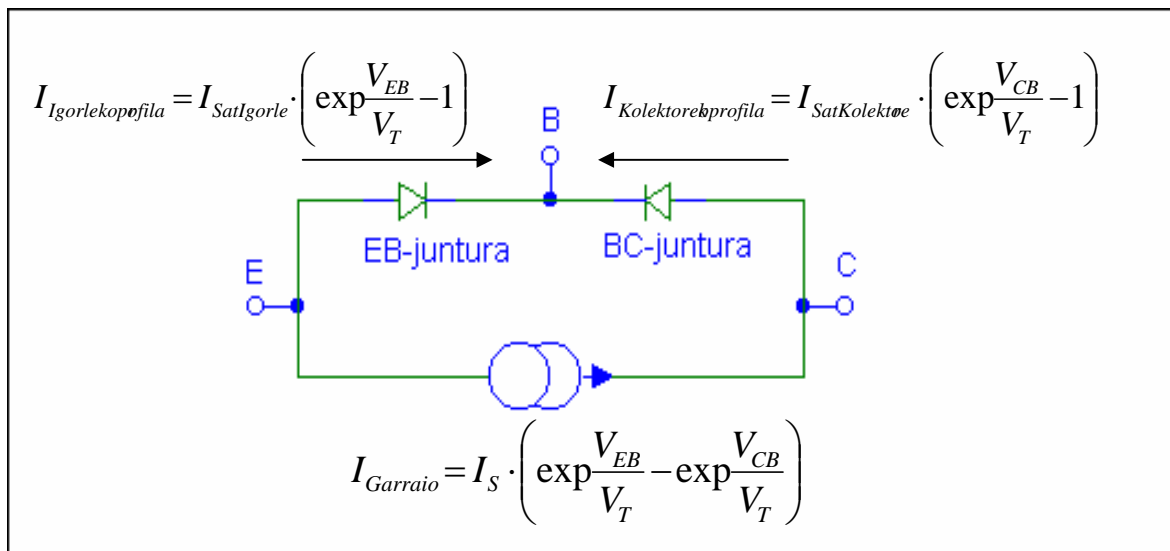
12.1.4 EBERS-MOLLEN EREDUA GARRAIOAREN IKUSPUNTUTIK

Transistorea igorletik kolektorera zeharkatzen duen korrontea parametro nagusitzat hartuz, ekuazioak beste forma batez adieraz daitezke. $I_{pe} \sim I_{pc}$ ($\alpha_T \sim 1$) onartuz:

$$I_{pe} = I_{pc} = -qD_{mB} \text{malda} = q \frac{n_i^2}{N_B} \frac{D_{mB}}{W_B} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \right] = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \right]$$

$$I_E = I_{pe} + I_{ne} = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \right] + I_{satGORLEKOPROFIL} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_C = -I_{pe} + I_{Nkolektorekoprofiletik} = -I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \right] + I_{satKOLEKTOREKOPROFIL} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$



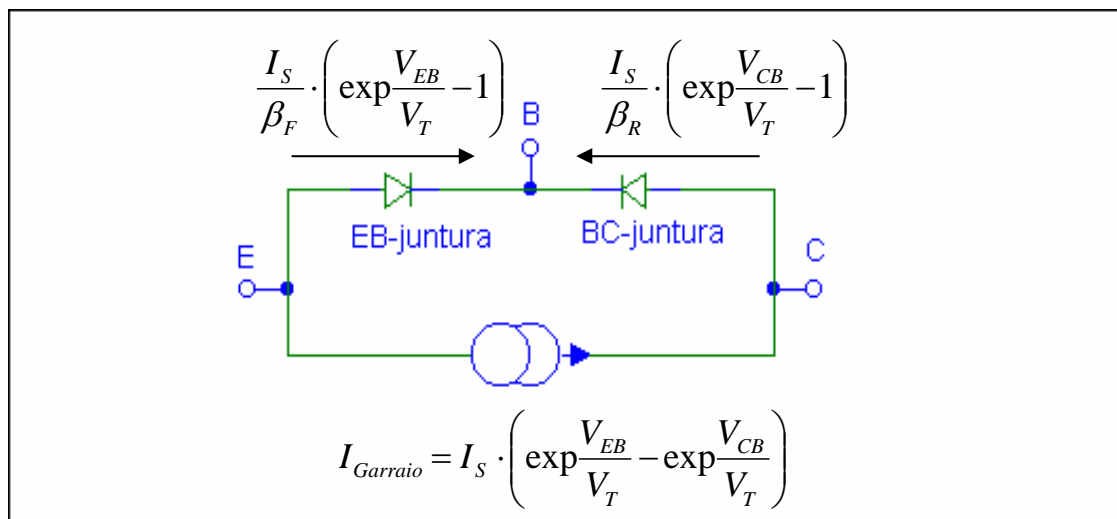
12.3 Irudia. Zirkuitu baliokidea garatzea: garraiatzen den korrontea eta beste osagaiak

$$I_{sat\text{GORLE-BASEJUNTURA}} = I_{sat\text{GORLEKOPROFIL}} + I_S = (1/\gamma) I_S = I_S / \alpha_F \Rightarrow$$

$$I_{sat\text{GORLEKOPROFIL}} = I_S (1/\alpha_F - 1) = I_S \frac{1 - \alpha_F}{\alpha_F} = I_S \frac{1}{\beta_F}$$

$$I_{sat\text{KOLEKTORE-BASEJUNTURA}} = I_{sat\text{KOLEKTOREKOPROFIL}} + I_S = (1/\gamma') I_S = I_S / \alpha_R \Rightarrow$$

$$I_{sat\text{KOLEKTOREKOPROFIL}} = I_S (1/\alpha_R - 1) = I_S \frac{1 - \alpha_R}{\alpha_R} = I_S \frac{1}{\beta_R}$$



12.4 Irudia. Zirkuitu baliokidea, garraiatzen den korronea ardatz gisa hartuz

$$I_E = I_{pe} + I_{ne} = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \right] + \frac{I_S}{\beta_F} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_C = -I_{pe} + I_{Nkolektorekoprofiletik} = -I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \right] + \frac{I_S}{\beta_R} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

Transistoreak aktiboan lan egiten duenean, BC junturako korronea ez da aintzat hartzeko modukoa, eta 12.4 Irudiko zirkuitutik aurreko ikasgaien lortzen genuen zirkuitu baliokidera iristen gara (ikus 11.7 Irudia).

12.1.5 EBERS-MOLLEN EKUAZIOEN KASU BEREZIAK

Jarraian, aurreko ekuazioek lau lan-guneetan dituzten adierazpen erraztuak garatuko dira. Analisia pnp transistoreentzat egiten da bakarrik, npn motaren kasua analogoa delako.

MODU AKTIBOAN

$V_{EB} > 0$ eta $V_{CB} < 0$, $\exp(V_{EB}/V_T) \gg 1$, $\exp(V_{CB}/V_T) \ll 1$

$$I_E = I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) + \alpha_R \cdot I_{CS} \approx I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$$I_C = -I_{CS} - \alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) \approx -\alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$$I_B = (\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - (\alpha_R - 1) \cdot I_{CS} \approx (\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

Beraz, $I_E > 0$ eta I_C eta $I_B < 0$; $\alpha_F \sim \alpha$

ASETASUNEAN

$V_{EB} > 0$ eta $V_{CB} > 0$, $\exp(V_{EB}/V_T) \gg 1$, $\exp(V_{CB}/V_T) \gg 1$

$$I_E = I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right)$$

$$I_C = I_{CS} \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - \alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$$I_B = -(1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right)$$

Korronteen noranzkoa (zeinua) V_{CB} eta V_{EB} balioen menpe dago (hori bai, asetasunean, I_B negatiboa da):

- $V_{EB} > V_{CB} > 0$ badira, orduan, $I_E > 0$ eta $I_C < 0$: Zuzeneko Asetasuna
- $V_{CB} > V_{EB} > 0$ badira, orduan, $I_E < 0$ izan liteke eta $I_C > 0$: Alderantzizko Asetasuna

➤ $V_{EB} = V_{CB} > 0$ badira, $I_E > 0$, $I_C \neq 0$

I_B korrontearen balioa modu aktiboan baino handiagoa da eta, beraz, I_C/I_B erlazioa murrizten da.

ETENDURAN

$V_{EB} < 0$ eta $V_{CB} < 0$, $\exp(V_{EB}/V_T) \ll 1$, $\exp(V_{CB}/V_T) \ll 1$

$$I_E = -I_{ES} + \alpha_R \cdot I_{CS}$$

$$I_C = -I_{CS} + \alpha_F \cdot I_{ES}$$

$$I_B = -(\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} - (\alpha_R - 1) \cdot I_{CS}$$

$I_E < 0$, $I_C < 0$ eta $I_B > 0$, eta ez daude tentsioen menpe.

ALDERANTZIZKOAN

$V_{EB} < 0$ eta $V_{CB} > 0$, $\exp(V_{EB}/V_T) \ll 1$, $\exp(V_{CB}/V_T) \gg 1$

$$I_E = -I_{ES} - \alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \approx -\alpha_R \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right)$$

$$I_C = I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) + \alpha_F \cdot I_{ES} \approx I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right)$$

$$I_B = -(\alpha_F - 1) \cdot I_{ES} + (\alpha_R - 1) \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) \approx (\alpha_R - 1) \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right)$$

$I_E < 0$, $I_C > 0$ eta $I_B < 0$, eta V_{CB} tentsioak agintzen du.

Aktiboarekin alderatuz, ez dugu funtzionamendu berbera (irabazia, esaterako) lortzen.

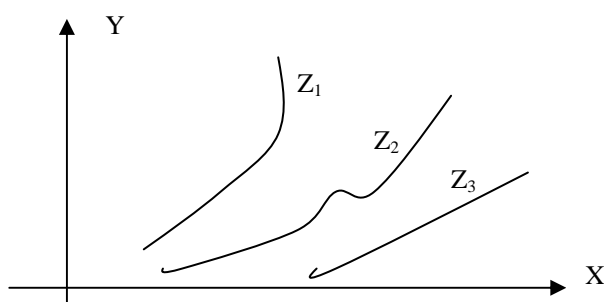
Zergatik? Kasu honetan I_{CS} korrontean baseak agintzen duelako ($N_B > N_C$). Kolektorearen injekzio-eraginkortasuna eta korronte-irabaziak txikiagoak dira igorlearenak (aktibokoak) baino.

12.2 Ezaugarri-kurbak (pnp transistoreentzat)

Ebers-Mollen ekuazioak grafikoki adierazten baditugu, BJT transistorearen ezaugarri-kurbak (I-V kurbak) lortzen ditugu.

Egitura bakoitzean, erlazionatu beharreko lau aldagai daude bakarrik: sarrerako eta irteerako korrante eta tentsioak, beste bi aldagaiak Kirchoffen legeak aplikatuz ebazten baitira. Gainera, Ebers-Mollen ereduak bi ekuazio independente ematen dizkigunez, dispositiboan bi aldagai aske daude. Ondorioz, $Y=Y(X,Z)$ formako bi ekuazio izaten ditugu.

Hori dela-eta, *kurba parametrikokoak* erabili behar ditugu, non, aldagai bat konstante mantenduz (parametrozat hartuz), beste bi aldagai erlazionatzen baitira.

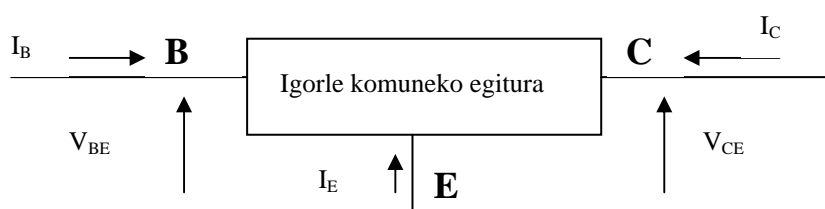


12.5 Irudia. $Y = Y(X,Z)$ funtzioaren adierazpena kurba parametrikoen bidez (parametroa, Z da)

Gainera, transistoreak zirkuituan hartzen duen posizioa dela-eta, igorleko juntura zuzenean polarizaturik egoten da eta $V_{CB} < V_{EB}$ izaten da (pnp batean). Beraz, $V_{EB} > 0$ eta $V_{CE} < 0$ ezberdintasunak onartzen dira (pnp motaren kasuan). Hau da, transistorea gune aktiboan edo asetasunean egoten da.

Azkenean, sarrerako eta irteerako ezaugarri-kurbak erabili ohi dira.

Adibidez, igorle komuneko konfigurazioan:



12.6 Irudia. Igorle komuneko konfigurazioa

Kasu honetan, sarrerako aldagaiak: I_B , V_{BE} ; eta irteerako aldagaiak: I_C , V_{CE} dira.

Hala, kurbak honako hauek dira:

- Sarrerako ezaugarri- kurba $I_B = I_B(V_{BE})$, V_{CE} parametro gisa erabiliz.
- Irteerako ezaugarri-kurba $I_C = I_C(V_{CE})$, parametrotzat I_B korronea hartuz.

Esan dugunez, zirkuitua dela-eta, normalean (pnp transistoreetan) $V_{EB} > 0$ eta $V_{EC} > 0$. Hori dela-eta alderantzizko modua ez da I-V ezaugarrietan irudikatzen.

12.2.1 SARRERAKO I-V KURBA

$$-I_B = (1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right] + (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

Aktiboan bagaude, $V_{CB} < 0$, $V_{EB} > 0$.

Askotan, $V_{CE} \ll 0$ V izango da, eta, orduan:

$$-I_B = (1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right] - (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS}$$

Hau da, I_B korroneak ez du $-$ ia- V_{CB} tentsioarekiko menpekotasunik eta kurba bakarra agertzen da.

Asetasunean bagaude, $0.7 > V_{CB} > 0$, $0.7 > V_{EB} > 0$ (beraz, $0 > V_{CE} > -0.7$ V tartean egongo da kasu guztietan). $V_{EB} \gg 0$ eta $V_{CB} \gg 0$ onartuz:

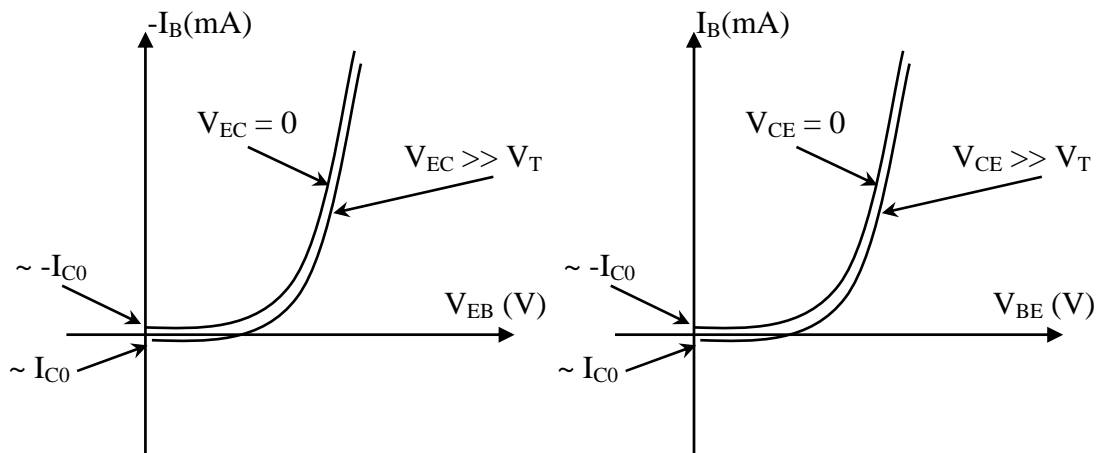
$$-I_B = (1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) + (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right)$$

Adibidez, $V_{CE} \sim 0$ denean, ($V_{CB} = V_{EB} \gg 0$).

$$-I_B = [(1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} + (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS}] \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

eta kurba diodoaren kurbaren antzekoa da.

($0 > V_{CE} > -0.7$ denean, ez dakigu zehatz-mehatz asetasunean edo aktiboan gauden. V_{BC} tentsioaren balioa kalkulatu beharko genuke).



12.7 Irudia. Sarrerako ezaugarri-kurbaren forma, pnp (ezkerrean) eta npn (eskuinean) transistoreen kasuetan.

12.2.2 IRTEERAKO I-V KURBA:

$$I_C = I_{CS} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right] - \alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

Aktiboan bagaude, $V_{CB} < 0$, $V_{EB} > 0$.

Adibidez, $V_{CE} < -0.7$ V den kasu guztietan (aktiboan nahiko sartuta gaude, eta $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} < 0$):

$$I_C = \beta \cdot I_B + (\beta + 1) \cdot I_{C0}. \quad (I_C \sim \beta \cdot I_B)$$

Eta I_C ez dago V_{CB} tentsioaren menpe (lehenengo hurbilketan). Beraz, ez du V_{CE} tentsioarekiko menpekotasunik ere (V_{EB} konstantea bada)

Bestalde, $I_B = 0$ denean, aktiboan egon gaitezke, baina praktikoki transistorea ia etenik dago eta, beraz, $I_C = I_{C0}$.

Asetasunean bagaude, $0.7 > V_{CB} > 0$, $0.7 > V_{EB} > 0$ (beraz, $0 > V_{CE} > -0.7$ beteko da kasu guztietan).

Orduan, baseko profilarren malda (I_{pe} eta I_{pc}) aktiboan baino txikiagoak dira $-I_C$ txikiagoa- baina baseko korrontea areagotzen da: batetik, bi junturek eramaileak injektatzen dituztelako eta, bestetik, baseko soberakina eta birkonbinaketa areagotzen direlako. Hau da, I_B korrontearen balio jakin baterako, I_C txikiagoa dugu.

Adibidez, $V_{CE} \sim 0$ denean, ($V_{EB} > 0$, $V_{CB} = V_{EB}$):

$$I_C = I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - \alpha_F \cdot I_{ES} \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) = (I_{CS} - \alpha_F \cdot I_{ES}) \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

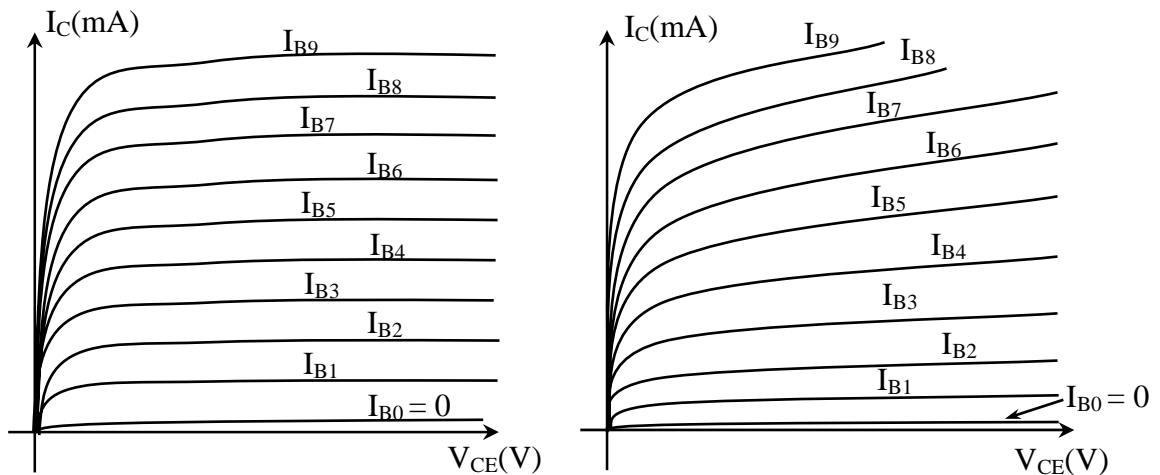
$$I_C = I_{CS} \cdot (1 - \alpha_R) \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$$-I_B = ((1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} + (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS}) \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$$-I_B = ((1 - \alpha_F) \cdot I_{ES} + (1 - \alpha_R) \cdot I_{CS}) \cdot \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$V_{CE} \sim 0$ denean, transistorea asetasunean dago ($V_{CB} = V_{EB} > 0$), bi junturak zuzenean daude eta I_C nahiko txikia izan daiteke junturak elkarren kontra ari direlako. Baseko profila laua da, malda = 0 eta, beraz, $I_{pe} = I_{pc} = 0$; $I_C \sim 0$.

Izan ere, muturreko kasu honetan, I_C negatiboa da.



12.8 Irudia. Irteerako ezaugarri-kurba ideal eta errealak

Gogoratu aktiboaren eta asetasunaren arteko muga $V_{BC} = 0$ berdintasunak (hau da, $V_{CE} = V_{BE}$ betetzen duen tentsioak) zehazten duela.

12.3 BJT idealarekiko desbideratzeak

BJT idealetik errealera pasatzerakoan, zenbait ezberdintasun ikusten ditugu. Horietako garrantzitsuenak bi dira:

- Early efektua.
- β parametroaren kolektoreko korrontearakiko menpekotasuna.

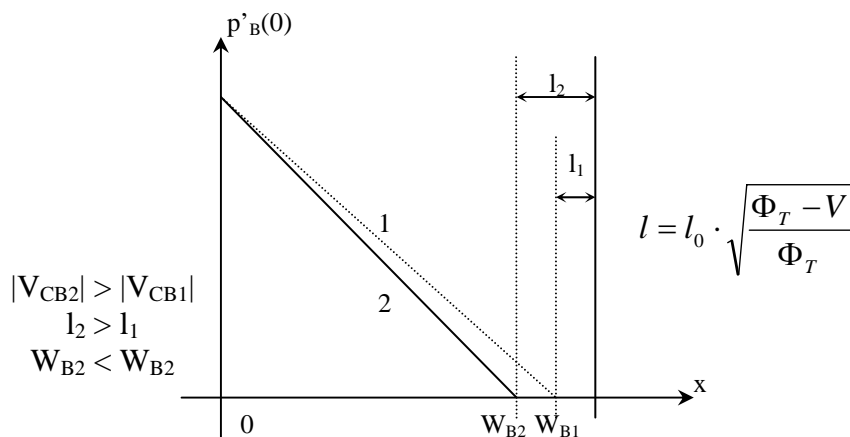
12.3.1 EARLY EFEKTUA

Orain arte erabilitako Ebers-Mollen ereduan, baseko zabalera (W_B) konstantetzat hartu dugu, baina igorleko eta kolektoreko junturretan aplikatutako tentsioek espazioko karga-gunea aldarazten dute. Hau da, V_{EB} eta V_{CB} tentsioek baseko eskualde neutroaren zabalera modulatu dute.

Zabaleraren aldaketaren ondorioz, zenbait parametro $-\beta$, besteak beste- aldatzen dira. Aktiboari dagokionez, I_C kolektoreko korrontearen V_{CE} tentsioarekiko menpekotasuna da ondorio nagusia.

PN juntura gogoratuz, hustutako gunea zabaltzen da, kolektoreko alderantzizko tentsioa haztean (zuzeneko polarizazioak ere modulatu du, baina alderantzizkoan efektua nabarmenagoa da). Kolektoreko alderantzizko tentsioa hazten bada, W_B pixka bat murrizten da (adibidez 0.05 mikroi). Baina, oinarria laburra denez, aldaketa txiki hori nabaritzen da. 12.9 Irudian, tentsioa aldatzeak dakarren profilaren aldaketa irudikatu da (basea laburra denez, bertako profila zuzen batez marraztu da).

Basea laburtuz, **transistore-efektua errazten da**: urrien gutxiago birkonbinatzen direnez, errazago heltzen dira kolektoreko junturaraino. Hori 12.9 Irudian ikus daiteke bai kolektoreko korronteari begiratu, bai azalerari begiratu:



12.9 Irudia. Early efektua eta baseko profila: bigarren kasuan, kolektoreko junturako (alderantzizko) tentsioa handiagoa da

Kolektoreko junturaren inguruan profilaren malda handiagoa da orain: I_C hazten da ($I_{pe} = K \cdot malda \uparrow$, $|I_C| \uparrow$).

Bestalde, birkonbinaketari dagokionez, profilarren azpiko *azalera* gutxitzen denez, basean metatzen diren urrienen karga gutxitzen da eta, beraz, I_{rB} murrizten da:

$$I_{rB} = q \cdot A \cdot \int_0^{w_B} \frac{urrien'(x)}{\tau_B} dx = \frac{Q_{base}}{\tau_B}$$

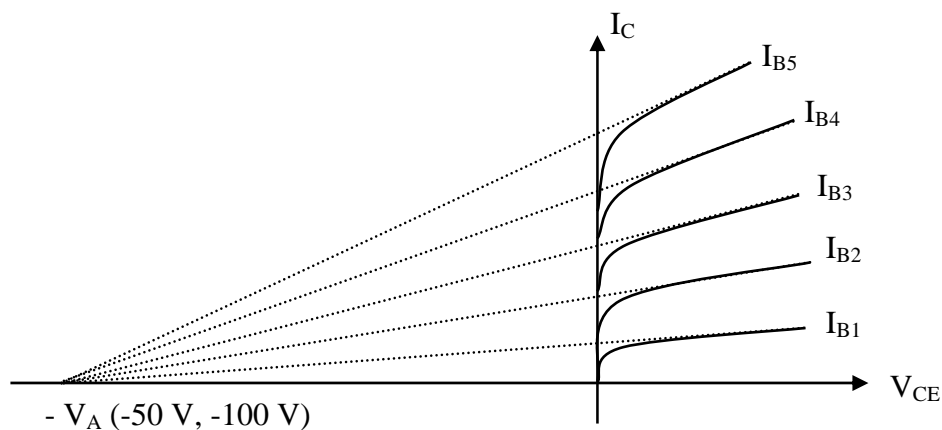
I_B korrontea txikiagotzen da.

Eta, beraz, α_T handitzen da (gauza bera gertatzen da α eta β parametroekin).

Early efektuaren ondorioz, kurbetan, V_{CB} (eta, beraz, V_{CE}) tentsioarekiko menpekotasunak agertzen dira: I_C korrontea ez da V_{CE} tentsioa igotzean asetzen (malda txiki bat izango du) eta I_B korrontea kurba bat baino gehiago ditu V_{CE} parametroa aldatzean.

Gainera, α eta β parametroen artean dagoen erlazioa dela-eta, α -ren aldaketa txikiek β parametroan eragin handia dute (α -ren %5eko aldaketak, %30koa eragiten du β -n).

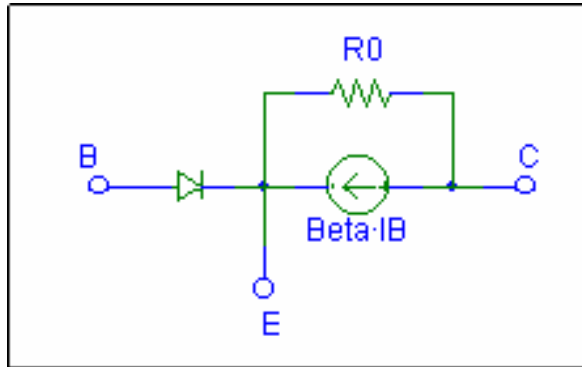
12.10 Irudian, npn baten I_C - V_{CE} ezaugarriak agertzen dira. Bertan ikusten denez, gune aktiboko kurben tarte zuzenen luzapenek puntu berean ebakitzen dute V_{CE} ardatza: $-V_A$ balioan, hain zuzen ere. Tentsio horrek **Early tentsioa** du izena eta, normalean, 50-100 volt inguruan egoten da.



12.10 Irudia. Npn transistoreen $I_C(V_{CE})$ ezaugarria eta Early tentsioa

Efektua, gehitu beharreko korronte txiki bat izaten denez, erresistentzia baten bidez adierazten da zirkuitu baliokideetan (menpeko korronte-sorgailuarekin paraleloan jarritz). Early tentsioa jakinez gero, jakineko polarizazio batean (I_C , V_{CE} batean) dagoen malda kalkula daiteke: $dV_{CE}/dI_C = R_0(\Omega)$.

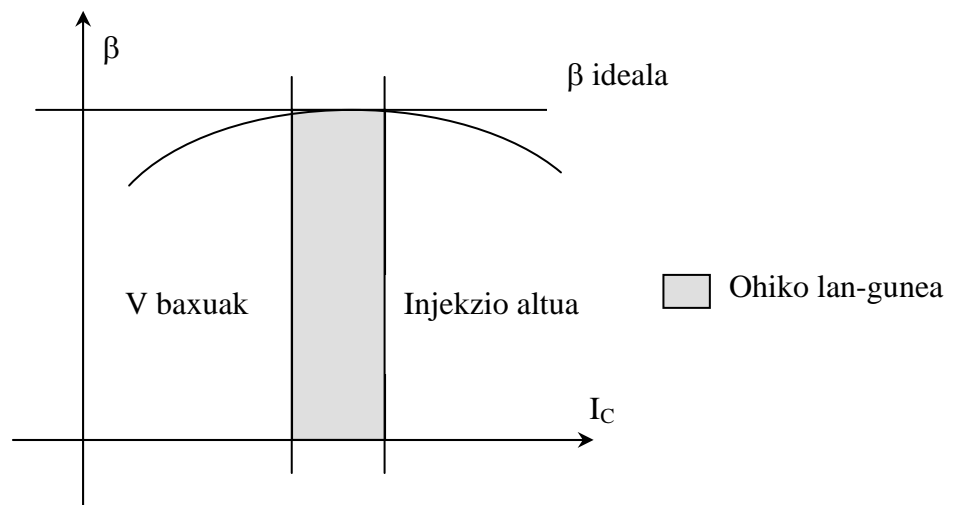
R_0 erresistentzia, kanpoko erresistentziak baino askoz handiagoa izaten denez, zirkuitutik kentzen da maiz.



12.11 Irudia. Early efektuaren erresistentzia zirkuitu baliokidean (aktiboan)

12.3.2 KOLEKTOREKO KORRONTEAREKIKO β PARAMETROAREN MENPEKOTASUNA

12.12. Irudian, β parametroak I_C korrontearekiko duen menpekotasuna islatu da.



12.12 Irudia. β parametroaren aldaketa I_C korrontea aldatzean

Tentsio baxuetan, I_B esandakoa baino handiagoa da, gune dipolarretako korronteak (hemen baztertu ditugunak) aintzat hartu behar baitira. I_C korrontearen analisisa bakarrik barreiapeneko osagaietatik eratortzen denez, β eraginkorra (I_C/I_B) txikiagoa da.

Tentsio altuetan, basea injekzio altuan sartu eta Augerren birkonbinaketa nabari daiteke. Ondorioz, I_{TB} eta I_B igotzen dira (eta, ondorioz, β txikiagotu). Gainera, korronte

altuetan kolektorean nahiko eskualde erresistiboa denez, tentsio ohmiko bat agertu, eta $I_C(V_{CE})$ kurba makur daiteke.

Bi kasuetan, I_C/I_B korrante-irabazia murrizten da: β jaisten da. Hori dela-eta, I_C-V_{CE} grafikoetan, kurben arteko aldea ez da konstantea: $I_C = \beta (I_C) \cdot I_B$. Guk, zirkuitu integratuek bezala, grafikoaren erdiko tartean lan egingo dugu, non β konstante mantentzen baita.

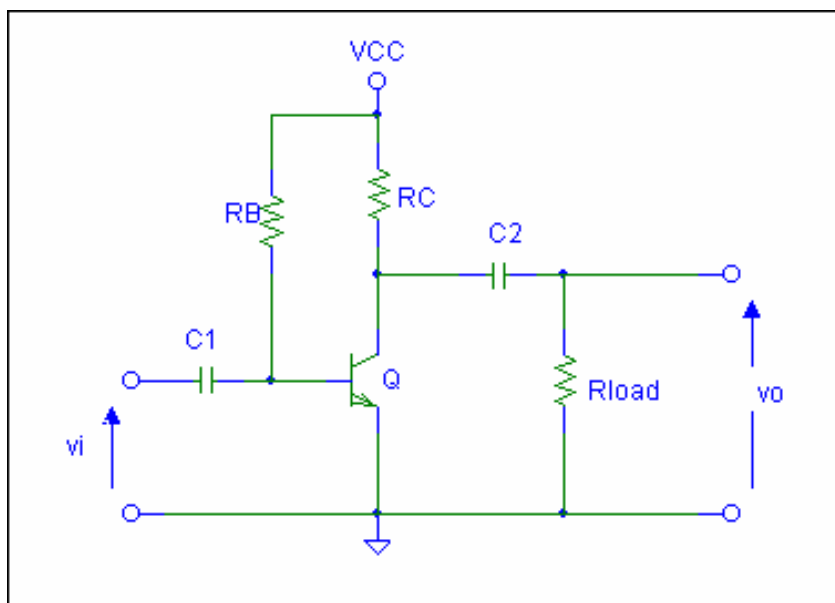
12.4 Transistore bipolarren lan-puntua finkatzea: karga-zuzen estatikoa

Lan-puntua (Q), funtzionamendu-puntua edo atsedeen-puntua (*atseden-puntua*, sarrerako seinale alternorik ez dagoela adierazten duelako), polarizazioak eragiten dituen korrante eta tentsio jarraituen multzoa da. Normalean, I_C eta V_{CE} jakitea nahikoa izaten da lan-puntua ezagutzat jotzeko.

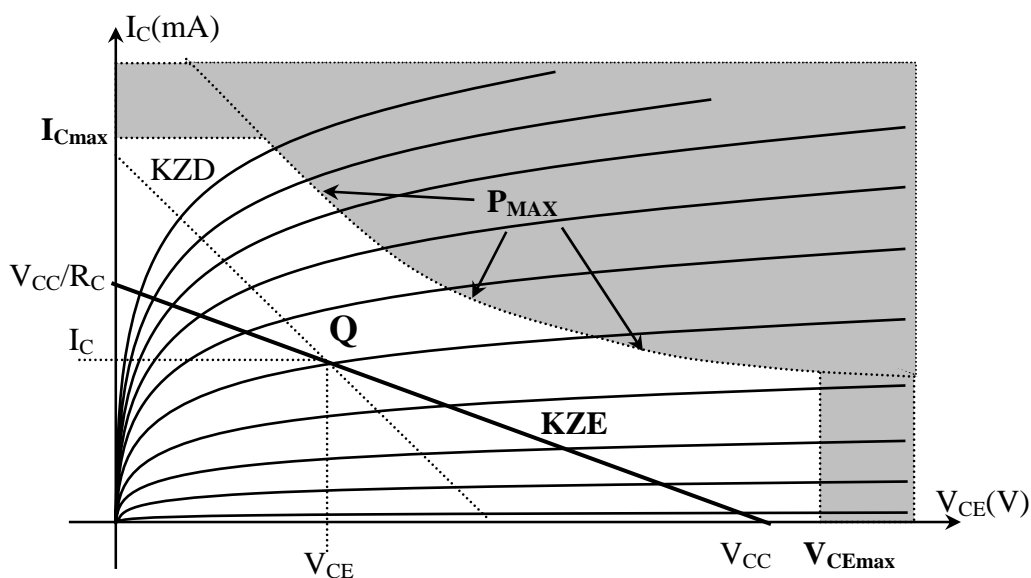
Haren garrantziaren adierazle diren hiru puntu aipatzeagatik:

- Transistorearen bidez, seinale alferno bat anplifika dezakegu; hau da, irteeran, sarrerako seinalearen forma bera, baina anplitude handiagoa dituen seinalea lor daiteke. **Hurrengo ikasgaietan ikusiko dugunez, Q egokia aukeratuz gero, anplifikazioaren irabazia doi edo alda dezakegu.**
- Bestalde, irteerako seinaleak ezin du nahi adinako balioa hartu, horrek transistorea modu aktibotik atera dezakeelako (asetasunera edo etendurara eramanez), edo, modu aktiboan jarraituz, linealtasuna gal dezakeelako. Horren ondorioz, **distortsioa** agertu ohi da: irteerako seinalearen forma ez zaio sarrerakoaren formari zehazki egokitzen. Irteerako seinaleak distortsiorik gabe har ditzakeen balio minimo eta maximoaren arteko aldeari (anplituderik handienari) **tarte dinamikoa** deitzen diogu.
Bada, Q ondo aukeratuz gero, tarte dinamikoa zabaltzen dugu.
- Gainera, transistoreak kanpora dezakeen gehieneko potentzia (P_{max}) eta jaso dezakeen gehieneko korranteak (I_{Cmax}) eta tentsioak (V_{BEmax} , V_{CEmax}) finituak dira.

12.13 Irudiko igorle komuneko zirkuituaren irteerako ezaugarria 12.14 Irudian islatu da, Q posible batzuk adieraziz. Elikadura (V_{CC}) eta erresistentziak egokiro aukeratu beharko ditugu, bipolarren nahi dugun Q puntuan lan egin dezan.



12.13 Irudia. Transistorea polarizatzeko zirkuitua



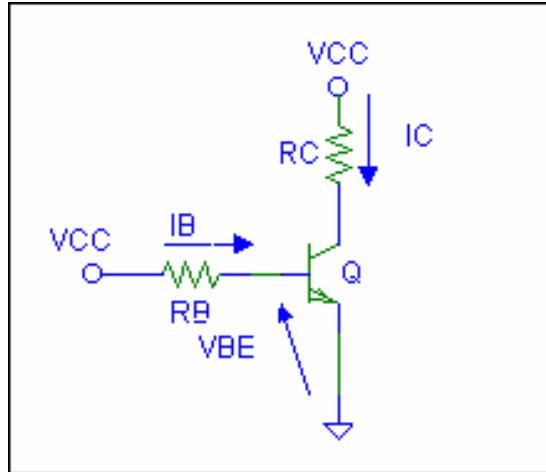
12.14 Irudia. Transistorearen polarizazio-puntua eta saihestu beharreko eskualdeak

Aurreko zirkuituko kondentsadoreen funtzioa osagai jarraituak eta alfernoak banatzea da. Hala, sarrerako eta irteerako seinaleek osagai alfernoa bakarrik izango dute, eta beste etapetako osagai jarraituek ez dute polarizazioan inolako eraginik izango. Horretarako, gure zirkuituetan ditugun kondentsadoreen kapazitatea nahiko altua izaten da, eta, korrante jarraituan zirkuitu irekiak badira ere, zirkuitulaburtzat joko ditugu korrante alfernoan (sarrerako seinalearen maiztasunean). Hau da: v_i tentsioak osagai jarraiturik baleuka ere, horrek ez luke polarizazioan inolako eraginik izango; eta kasu horretan lortzen den v_o irteerak ez dauka osagairik jarraiturik. Ondorioz, polarizazio-

puntua analizatzeko, osagai alternoko sorgailuak zirkuitulaburtzen ditugu eta kondentsadoreak zirkuitu irekiez trukutzen ditugu. Hori dela-eta, C_1 eta C_2 *paseko edo bypasseko kondentsadoreak* dira. Osagai jarraituak blokeatzen dituzte eta seinaleko (alternoko) tentsioei pasatzen uzten diete.

POLARIZAZIOAREN EBAZPENA: KARGA-ZUZEN ESTATIKOA

Kondentsadoreak zirkuitu irekiez (eta alternoko tentsio sorgailuak zirkuitu laburrez) aldatuz gero:



12.15 Irudia. Polarizazio-zirkuitua

Zirkuituko osagai guztiak jakinda, analitikoki ebatz ditzakegu korrronteak eta tentsioak.

Transistorea, normalean, modu aktiboan egongo da (hala dagoela onartuz ebatzi ondoren, aktiboaren hipotesia egiaztatu beharko dugu).

Adibidez: $R_B = 10k$; $R_C = 50\Omega$, $V_{CC} = 10\text{ V}$; $\beta = 100$;

$$V_{BE} + I_B \cdot R_B = V_{CC}$$

$$0,7V + I_B \cdot 10k = 10V \Rightarrow I_B = (10 - 0.7)\text{Volt} / 10k = 0.93mA$$

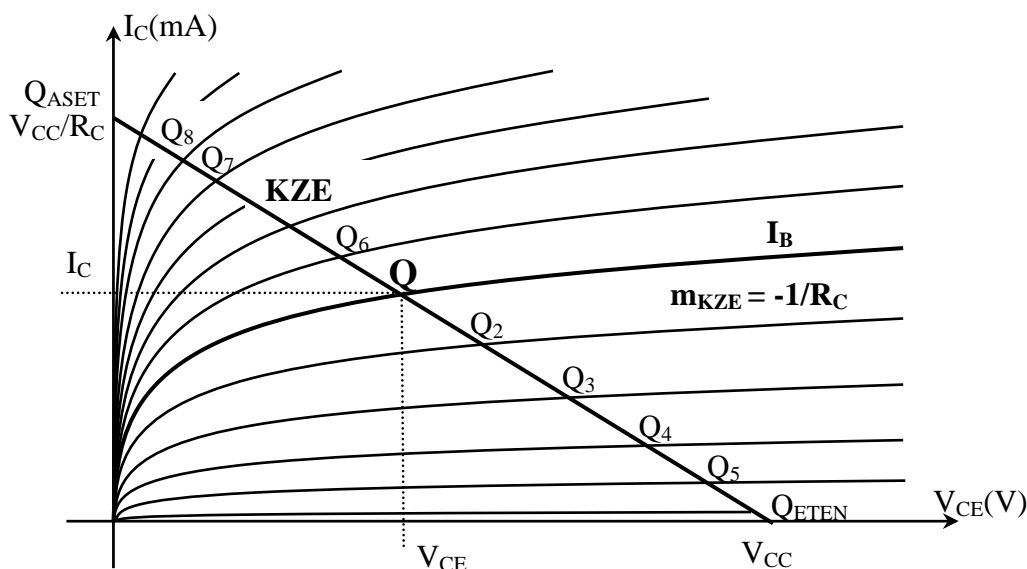
$$I_C = \beta \cdot I_B = 93mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C \Rightarrow V_{CE} = 10V - 93mA \cdot 50\Omega = 10V - 4.65V = 5.35V$$

Baina, diseinatzerakoan balio posible guztiak kontuan hartzeko, errazagoa da grafikoki lan egitea. Horretarako, R_B jakin ezean ere:

$$V_{CC} = V_{CE} + I_C \cdot R_C \rightarrow I_C = (V_{CC} - V_{CE}) / R_C$$

Eta V_{CC} eta R_C finkatuz gero, $I_C = I_C(V_{CE})$. Funtzio hori ($I_C = (V_{CC} - V_{CE}) / R_C$) zuzen bat da eta ezaugarri-kurban gainezar dezakegu:



12.16 Irudia. Ebazpen grafikoa: kargaren zuzena (estatikoan)

Kurba horren eta ezaugarriaren arteko gurutzean dago Q. Ezaugarri posible asko daudenez, modu errazean aukera dezakegu guk nahi dugun Q puntua.

Q posibleen zuzena, **kargaren zuzena** edo karga-zuzena deitzen diogu.

R_C aukeratuz gero, zuzenaren malda finkatzen dugu ($-1/R_C$). V_{CC} finkatzean, ordea, x ardatza ebakitzen duen puntua. Bien zatidurak gehienezko I_C korrontea adierazten digu.

Grafikoki Q finkatu ondoren, I_C , V_{CE} eta I_B ateratzen ditugu. Nahi dugun I_B korrontea jakinda, R_B ebazten da.

Askoz errazagoa izaten da, beraz, grafikoki diseinatzea analitikoki diseinatzea baino (tentsio-irabazi jakin bat lortu nahi badugu, ordea, seinale txikiko zirkuitutik hasi behar dugu).

12.5 Polarizazioaren egonkortasuna

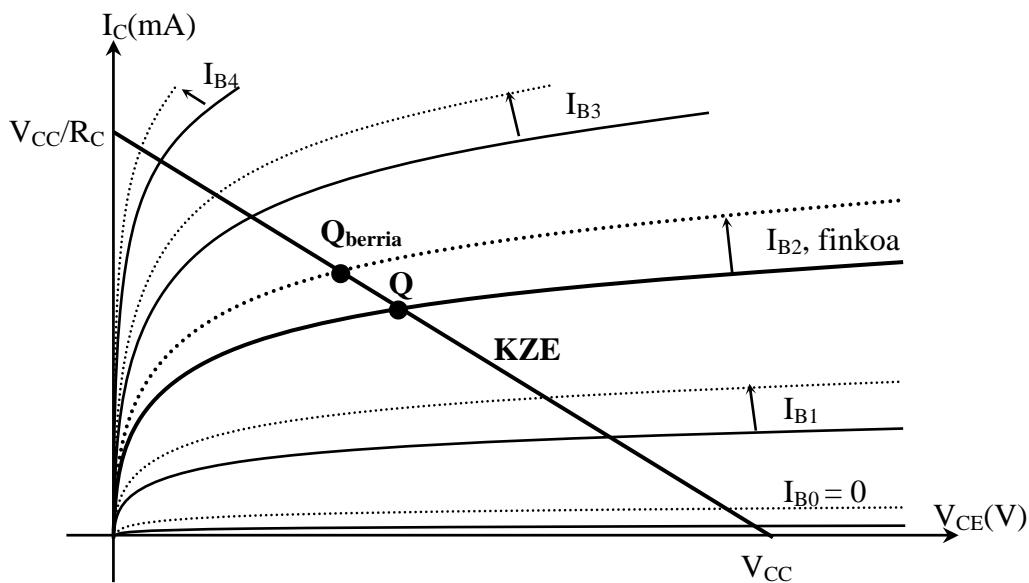
12.5.1 Q PUNTUAREN ALDAKETAK

Transistoreen fabrikazioan parte hartzen duten prozesu guztien kontrol zehatza posible ez denez, I_{C0} eta β ez dira berdinak ez eta multzo bereko transistoreetan ere. Hau da: $\beta, I_{C0} = \beta, I_{C0}(\text{alea})$. Era berean, transistoreen β tenperaturarekin aldatzen da: $\beta = \beta(T)$.

Hori dela-eta, (behin Q lan-puntua aukeratuz gero) Q puntua β edo I_{C0} parametroekiko ahalik eta independenteena izatea komeniko litzaiguke, diseinatutako

zirkuituak transistore askorekin eta baldintza askotan egokiro lan egin dezan. Puntu horretan, aldaketan aurrean (aldaketak saihesteko / eragozteko) zirkuitu batzuek aurkezten duten sentikortasuna analizatuko da.

12.13 Irudiko zirkuituan, adibidez, erresistentzien balioak jakinez gero (eta balio horiek, normalean, ez dira temperaturarekin edo osagai batetik bestera aldatzen), I_B kalkulatu dugu. Jarraian, transistorearen β jakinez gero, $I_C \sim \beta \cdot I_B$. Baina fabrikazio multzo bereko transistoreetan edota temperaturarekin aldatzen da β hori (fabrikatzaileen datu-orrietan, gehienezko, gutxienezko eta batez besteko β -k agertu ohi dira). Ondorioz, lan-puntua nabarmenki alda daiteke (ikus 12.13 Irudia).



12.17 Irudia. β igotzean (I_B mantenduz) Q nola aldatzen den

Efektu berdintsuak agertzen dira I_{C0} eta V_{BE} (V_T) temperatura dela-eta aldatzen direnean: temperatura 1°C igotzean, I_{C0} bikoizten da eta V_{BE} 2.5 mV jaisten da.

Q puntuaren aldaketa horiek onartezinak gerta daitezke batzuetan, BJTa asetasunean edo etenduran ere sar baitezakete. Normalean, Q (hau da, I_C eta V_{CE}) mantentzea oso komenigarria da, I_B aldatu behar bada ere.

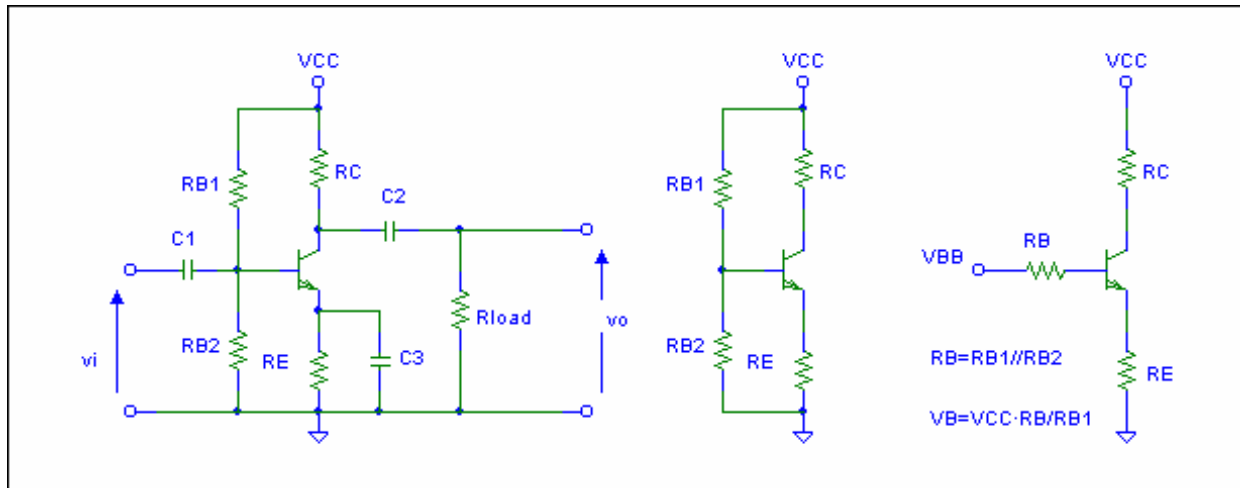
Horregatik, lan-puntuaren egonkortasuna areagotzen (edo ziurtatzen) duten beste hainbat zirkuitu proposatzen dira.

Guk, β -ren aldaketetan jarriko dugu arreta. eta temperaturarekin gertatzen diren Q puntuaren aldaketak ez ditugu sakonean analizatuko.

12.5.2 AUTOPOLARIZAZIO ZIRKUITUA EDO IGORLEAREN BIDEZKO

POLARIZAZIOA: BERRELIKADURA NEGATIBOA

β -ren aldaketekin Q egonkorra lortzeko, 12.14 Irudiko zirkuitua erabil dezakegu (autopolarizazio-zirkuitua).



12.18 Irudia. Autopolarizazio-zirkuitua: igorle komuneko egitura

Zirkuitu hori aurrekoarekin alderatuz (ikus 12.13 Irudia) ikusten dugun alderik nabarmenena R_E da. C_3 kondentsadorea nahiko handia izaten da, seinale jarraituan zirkuitu ireki eta altxatzen den zirkuitulabur bihurtzen da. Hala, R_E polarizazioa analizatzerakoan baino ez da agertzen. Hori dela-eta, igorleko kondentsadorea ezabaketakoa edo desakoplamendukoa dela esaten dugu.

Lan-puntua egonkortzea da R_E erresistentziaren helburua. Hori lortzeko prozedura honako hau da:

- Demagun I_C igotzen dela, adibidez β igotzen delako (edo, temperatura igo dela-eta, I_{C0} hazi eta V_{BE} tentsioaren murriztu direlako).
- Ondorioz, R_E erresistentzian erortzen den tentsioa hazten da.
- Horren ondorioz, I_B jaisten da, zeren eta $I_B = (V_{THB} - V_{BE} - V_{RE}) / R_{THB}$
- Eta horrek I_C txikiagoa dakar.

Gauza bera gertatzen da I_C jaisten denean: I_C jaisten bada (β edo temperatura jaisten direlako), R_E erresistentzian erortzen den tentsioa gutxitzen da. Horren ondorioz, I_B hazten da eta I_C handitzen du horrek.

Beraz, efektu batek (I_C korrontearen igoerak edo jaitsierak) kontrako erreakzioa ekarri du (murrizketa edo hazkundea). *Berrelikadura negatiboa* deitzen zaio ziklo horri.

Zirkuitu horretan, beraz, I_B ez da konstantea, eta nekezago kalkulatu da. I_B ez da lehen bezain egonkorra, baina I_C egonkorragoa da eta korrante horrek du garrantzirik handiena Q puntuari dagokionez.

Jarraian, β -rekiko menpekotasunaren murrizketa hori analitikoki ikusiko dugu.

12.5.3 I_C -REN β -REKIKO EGONKORTASUNA: SENTIKORTASUNA

$$V_{BB} - V_{BE} = I_B \cdot R_B + (I_B + I_C) \cdot R_E$$

$$\text{Baina } I_C = \beta \cdot I_B + (1 + \beta) \cdot I_{C0} \Rightarrow I_B = \frac{I_C - (1 + \beta) \cdot I_{C0}}{\beta}$$

$$\text{Beraz } V_{BB} - V_{BE} = \frac{I_C - (1 + \beta) \cdot I_{C0}}{\beta} \cdot (R_B + R_E) + I_C \cdot R_E$$

$$I_C = \frac{V_{BB} - V_{BE} + \frac{(1 + \beta) \cdot I_{C0} (R_B + R_E)}{\beta}}{\frac{R_B + R_E}{\beta} + R_E}$$

$$I_C = \frac{\beta}{R_B + R_E (\beta + 1)} \left[V_{BB} - V_{BE} + \frac{(1 + \beta) \cdot I_{C0} (R_B + R_E)}{\beta} \right]$$

β parametroaren ohiko balioekin, $(\beta + 1)/\beta \sim 1$, eta, beraz, β aldatzen denean mako artekoak ia konstante jarraitzen du (gutxi gorabehera).

$$I_C = \frac{\beta}{R_B + R_E (\beta + 1)} \left[V_{BB} - V_{BE} + \frac{(1 + \beta) \cdot I_{C0} (R_B + R_E)}{\beta} \right] = \frac{K \cdot \beta}{R_B + R_E (\beta + 1)}$$

Ikusten denez, $\beta \cdot R_E \gg R_B$ denean, I_C ez dago β -ren menpe.

Baina, egonkortasuna kuantifikatzeko, β -ren igoera eta I_C korrontean agertzen zaigun hazkundera erlazionatu behar ditugu (eta hazkundera erlatibizatu):

$$\frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C1}} = \frac{\frac{K \cdot \beta_2}{R_B + R_E (\beta_2 + 1)} - \frac{K \cdot \beta_1}{R_B + R_E (\beta_1 + 1)}}{\frac{K \cdot \beta_1}{R_B + R_E (\beta_1 + 1)}}$$

$$\frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C1}} = \frac{\beta_2 [R_B + R_E (\beta_1 + 1)] - \beta_1 [R_B + R_E (\beta_2 + 1)]}{\beta_1 [R_B + R_E (\beta_2 + 1)]}$$

$$\frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C1}} = \frac{R_B + R_E}{\beta_1 [R_B + R_E (\beta_2 + 1)]} (\beta_2 - \beta_1)$$

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = \frac{R_B + R_E}{[R_B + R_E (\beta_2 + 1)]} \cdot \frac{\Delta \beta}{\beta_1}$$

$$\text{Sentikorta suna } I_C^{\beta} \equiv \frac{\frac{\Delta I_C}{I_C}}{\frac{\Delta \beta}{\beta_1}} = \frac{R_B + R_E}{[R_B + R_E (\beta_2 + 1)]}$$

Hau da, sentikortasunak, definizioz, aldaketa erlatiboen arteko erlazioa ematen digu. Zenbat eta sentikortasun handiagoa, orduan eta menpekotasun handiagoa, ezegonkorragoa. Parametro horretan, berriro egiazta dezakegu I_C korrontearen β -rekiko egonkorra izateko baldintza: $\beta \cdot R_E \gg R_B$.

Beraz, Q puntuaren egonkortasuna ziurtatzeko, autopolarizazio-zirkuitua erabiltzeaz gain, $R_B \ll \beta R_E$ ezberdintasuna bete behar da.

Orduan, β hazten bada, I_C ere hazten da, baina –ehunekoetan- β baino gutxiago.

Diseinuetan zer zirkuitu erabili behar dugun ez badigute esaten, autopolarizaziokoa erabiliko dugu Q puntuaren egonkortasuna dela-eta (eta $R_B \ll \beta R_E$ ziurtatuz).

Gainera, datorren ikasgaiaren ikusiko dugunez, Q puntua, ahal izanez gero, kargazuzen *dinamikoaren* erdian kokatu beharko dugu.

12.5.4 ALDAKETAK TENPERATURAREKIN: SENTIKORTASUN-FAKTOREAK

Tenperatura aldatzen denean, I_{C0} , V_{BE} eta β aldatzen dira eta, beraz, I_C polarizazio-korrontean, aldaketak agertzen dira. Tenperatura 1 °C igitzean, adibidez, I_{C0} bikoizten da eta V_{BE} 2.5 mV txikiagoa da.

12.1 Taula. Transistorearen zenbait parametroren aldaketak tenperaturaren arabera

T^a (°C)	I_{C0} (pA)	V_{BE} (V)	β
-65	0.2	0.85	20
20	100	0.65	50
100	20.000	0.48	80

I_C korronteak parametro horiekiko dituen aldaketak aurreikusteko, I_C korrontearen sentikortasunak (S) erabiltzen dira, honela definituta:

$$S_x^y = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y} \Rightarrow \frac{\partial y}{y} = S_x^y \frac{\partial x}{x} \quad \text{askotan } S_x^y = \frac{\partial y}{y} (\partial x/x = 1, \text{ edo } \%1) \quad \text{edo } S_X^Y = \frac{\partial Y}{\partial X}$$

$$S(I_{C0}) = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{C0}} \right|_{\text{beste parametroak konstante mantenduz}}, S(V_{BE}) = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}} \right|_{\text{bpkm}} \quad \text{eta } S(\beta) = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta \beta} \right|_{\text{bpkm}}$$

Orduan, I_C -ren hazkundera (gutxi gorabehera) kalkulatzeko, honako formula hau erabil daiteke:

$$\Delta I_C = S(\beta) \cdot \Delta \beta + S(I_{C0}) \cdot \Delta I_{C0} + S(V_{BE}) \cdot \Delta V_{BE}$$

M, EGONKORTASUN FAKTOREA

Batzuetan, sentikortasuna honela adierazten da:

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = \frac{R_B / R_E + 1}{\beta_1 \frac{R_B / R_E + (\beta_2 + 1)}{1 + \beta}} \cdot \frac{1}{1 + \beta} \Delta \beta = \frac{R_B / R_E + 1}{\beta_1 / M} \cdot \frac{1}{1 + \beta_2} \Delta \beta$$

$$\text{non } M = \frac{1 + \beta_2}{R_B / R_E + (\beta_2 + 1)}$$

M antzeko beste analisi batzuetan agertzen da.

$$\text{Orduan, } \frac{\Delta I_C}{I_C} = M \frac{R_B / R_E + 1}{\beta_1 (1 + \beta_2)} \cdot \Delta \beta \approx (\beta_2 \gg 1) \approx (R_B / R_E + 1) \frac{M}{\beta_1 \beta_2} \cdot \Delta \beta$$

Eta I_C β parametroaren aldaketen aurrean egonkorra izateko,

$$(R_B / R_E + 1) \frac{M}{\beta_1 \beta_2} \ll 1 \quad \text{behar dugu.}$$

Horretarako, nahikoa da $R_B \ll R_E$ eta $M \sim 1$; hau da $R_B \ll \beta R_E$.

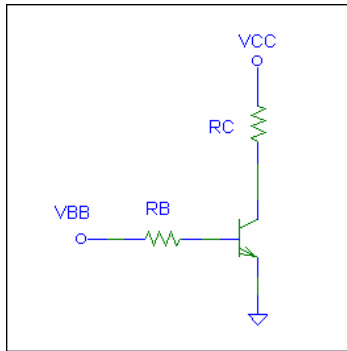
M egonkortasun-faktorea deitzen da, I_C korrontearen menpekotasunak ebazteko balio baitu, bai β -rekin, (ikusitako bezala) bai I_{C0} edo V_{BE} parametroekin. M nahiko konplexua gertatu bada ere, beste bi kasuetan ere agertuko litzatekeelako aipatu dugu hemen.

$I_C = I_C(\beta, V_{BE}, I_{C0})$, beste zirkuitu batzuetan, ezberdina da, baina, $-M \sim 1$ bada-
 $R_B \ll \beta R_E$ betearaziz, egonkortasuna ziurtatzen dugu.

ZIRKUITU JAKIN BATZUEN SENTIKORTASUN-PARAMETROAK

$$S_x^y = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y} \Rightarrow \frac{\partial y}{y} = S_x^y \frac{x}{\partial x} \text{ askotan } S_x^y = \frac{\partial y}{\partial x}$$

Polarizazio finkoa



$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

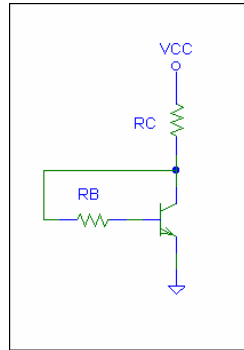
$$I_C \approx \beta \cdot \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$S(I_{C0}) = (\beta + 1)$$

$$S(V_{BE}) = -\frac{\beta}{R_B}$$

$$S(\beta) = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

Polarizazioko berrelikadurarekin



$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_C}$$

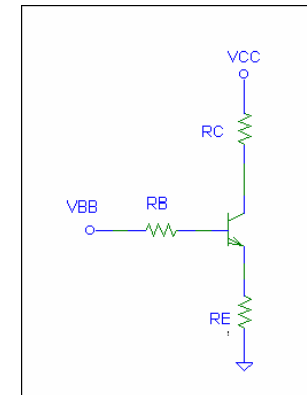
$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{CC} - V_{BE})}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_C} \approx \left\langle \beta \gg \frac{R_B}{R_C} \right\rangle \approx \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_C}$$

$$S(I_{C0}) = (\beta + 1) \cdot \frac{1 + R_B/R_C}{\beta + 1 + R_B/R_C}$$

$$S(V_{BE}) = -\frac{\beta}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_C}$$

$$S(\beta) = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \cdot \frac{1 + R_B/R_C}{1 + \beta_2 + R_B/R_C}$$

Igorleko polarizazioarekin



$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

$$I_C = \frac{\beta \cdot (V_{BB} - V_{BE})}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E} \approx \left\langle \beta \gg \frac{R_B}{R_E} \right\rangle \approx \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E}$$

$$S(I_{C0}) = (\beta + 1) \cdot \frac{1 + R_B/R_E}{\beta + 1 + R_B/R_E}$$

$$S(V_{BE}) = -\frac{\beta}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

$$S(\beta) = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \cdot \frac{1 + R_B/R_E}{1 + \beta_2 + R_B/R_E}$$

