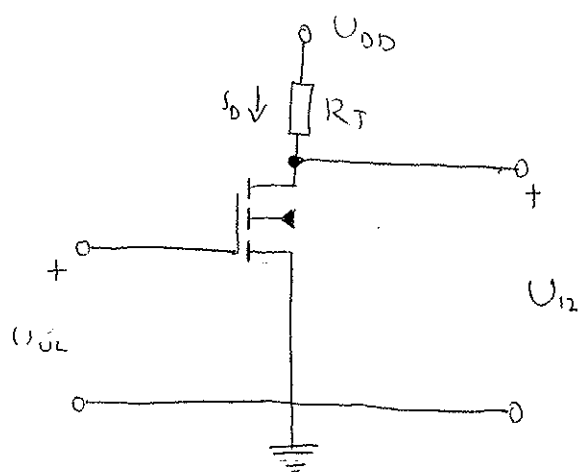


MOSFET

- ima tri priključka - jedan se spaja u ulazni krug
- drugi se spaja u izlazni krug
- treći se spaja i u ulazni i u izlazni krug - zajednički priključak
- UVOD (S)
- ODVOD (D)
- UPRAVLJAČKA DIODA (G) } 3 „bitna“ priključka koji određuju rad diode
- podloga (body, B) - uvijek se spaja na masu
- tri osnovna spoja FET-a - spoj zajedničkog uvoda, odvođača i upravljačke diode
- primjer - najčešći spoj - zajednički uvod:



- izlazni napon je određen naponom napajanja (U_{DD}), strujom (i_D) i otporom trošila (R_T):

$$U_{IZ} = U_{DD} - i_D \cdot R_T \quad (U_{IZ} = U_{DS})$$

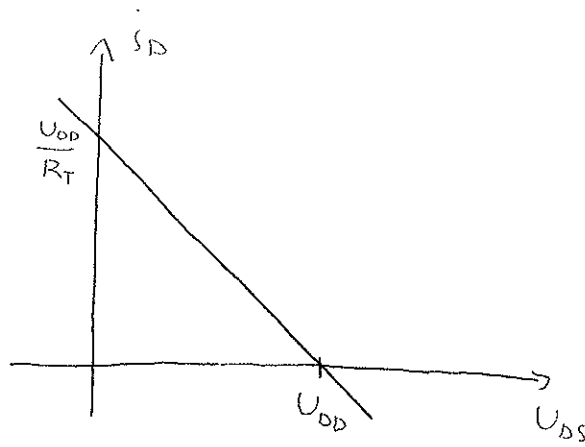
- ovisnost izlaznog napona o struji ($U_{IZ} = F(i_D)$) je linearna.
- ta ovisnost prikazana u polju izlaznih karakteristika je pravac (radni pravac)

- Radni pravac:

$$U_{IZ} = U_{DS} = U_{DD} - R_T \cdot i_D$$

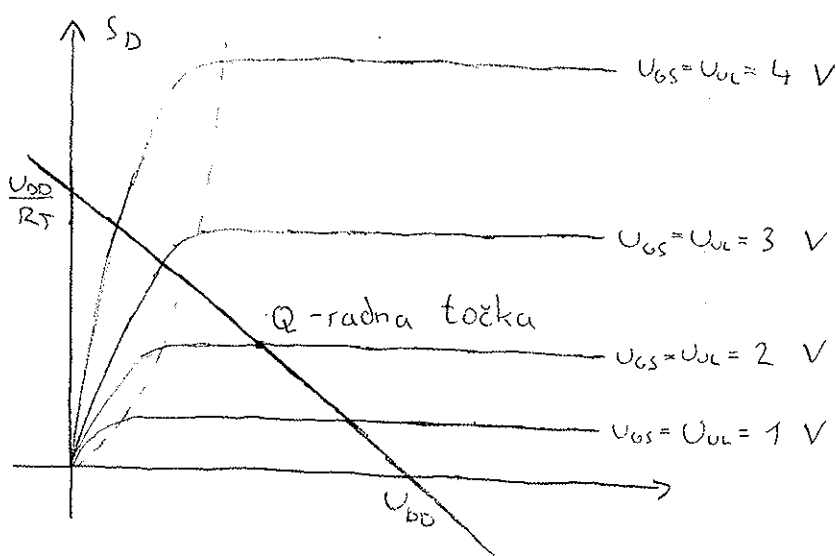
⇓

$$i_D = \frac{U_{DD} - U_{DS}}{R_T}$$

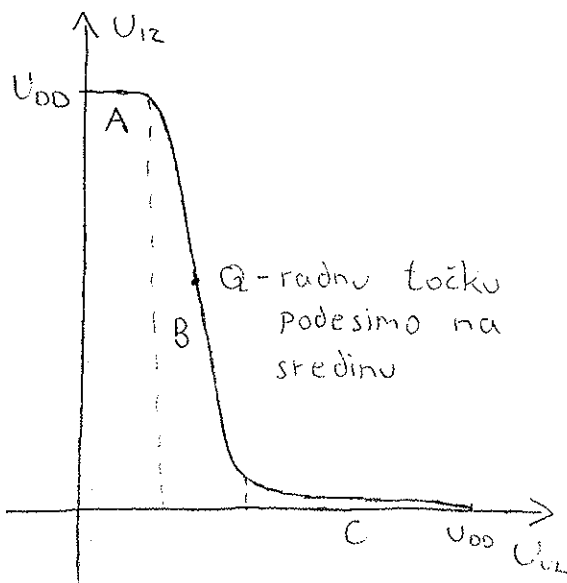


RADNI PRAVAC + IZLAZNA KARAKTERISTIKA = RADNA TOČKA

- radna točka je određena sjecištem radnog pravca i izlazne karakteristike tranzistora



- prienosna karakteristika FET-a u spoju zajedničkog uloda



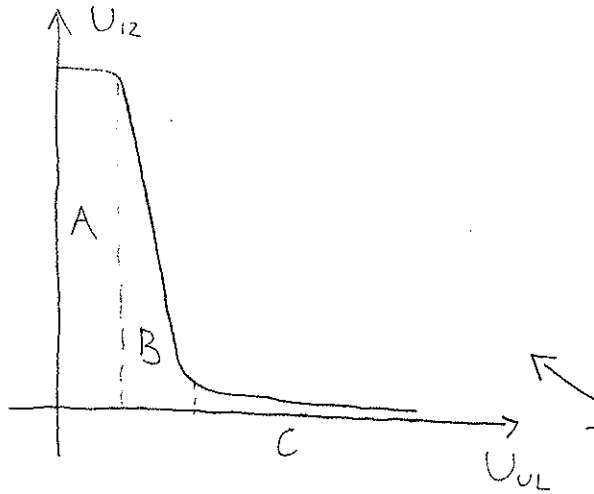
A - mali ulazni napon, MOSFET ne vodi ($i_D = 0$), pa je sav napon U_{DD} na izlazu ($U_{IZ} = U_{DD}$) (zapiranje)

B - MOSFET je počeo voditi i nalazi se u području zasićenja

C - triodno područje, velik ulazni napon, velika struja, sav napon na otporu R_T , mali izlazni napon (2)

- MOSFET u spoju zajedničkog ulaza možemo koristiti na više načina:
 - sklopka (digitalna elektronika)
 - pojačalo (analogna elektronika)

- prijenosna karakteristika:

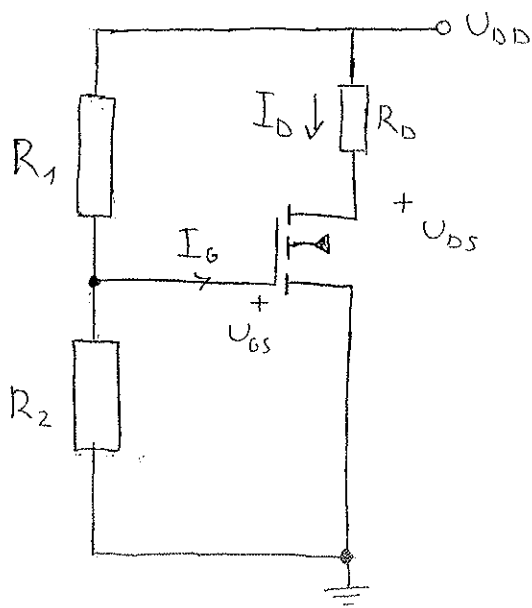


- područja A (zapiranje) i C (triодно) se koriste kao sklopka, tj. mogu poprimiti visoku ili nisku vrijednost
- konkretan primjer se ponaša kao inverter

- u području B (zasićenje) imamo veliko naponsko pojačanje, ali negativno (ulazni i izlazni napon su u protufazi)

* PODEŠAVANJE STATIČKE RADNE TOČKE

- istosmjernom komponentom napona, statičku radnu točku pojačala namještamo na sredinu karakteristike
- tu komponentu dobijemo od napona U_{DD} naponskim djelilom



- u upravljačku diodu ne teče istosmjerna struja ($I_G = 0$), pa je napon U_{GSQ} jednak

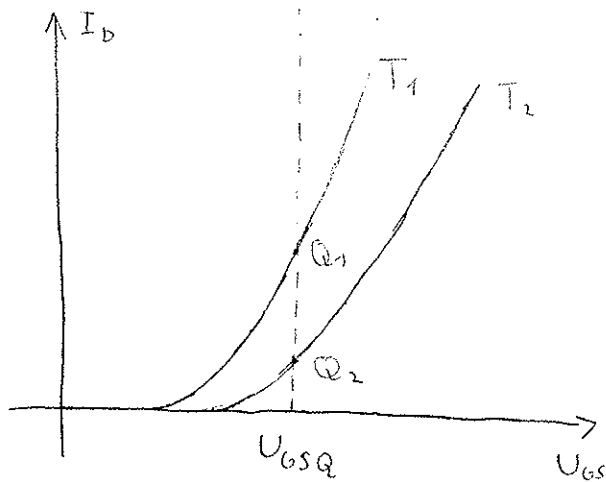
$$U_{GSQ} = U_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \text{ a izlazni}$$

napon je jednak:

$$U_{DSQ} = U_{DD} - R_D \cdot I_{DQ}$$

• nedostaci prethodnog sklopa:

- prijenosna karakteristika ($I_D = f(U_{GS})$!!!)



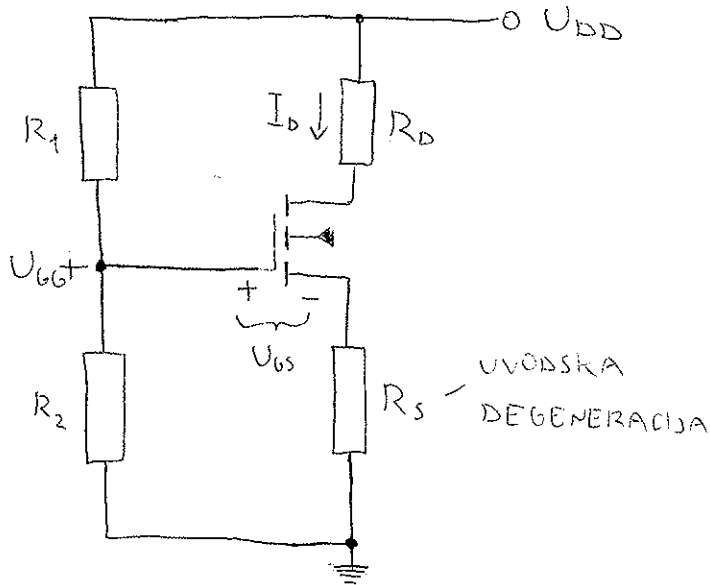
- možemo raditi samo su U_{GSQ} i U_{DSQ} koji su istih predznaka

- radna točka je osjetljiva na promjene (okomit radni pravac, male promjene parametara, jako utječu na radnu točku)

- te probleme rješavamo stabilizacijom radne točke

* STABILIZACIJA RADNE TOČKE

- u prethodni sklop dodajemo otpornik R_S (uvodska degeneracija)



$$U_{GG} = U_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

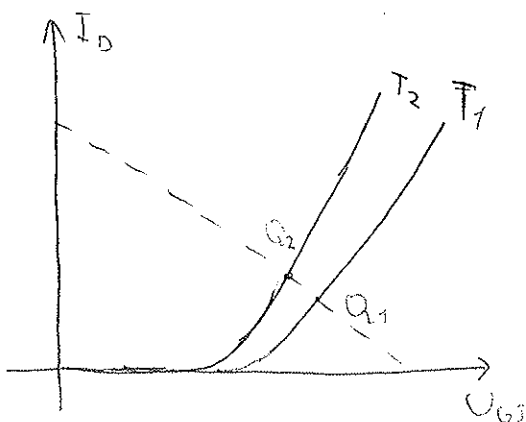
$$U_{GG} = U_{GS} + R_S \cdot I_D$$

$$U_{DS} = U_{DD} - (R_D + R_S) \cdot I_D$$

- Ovaj sklop je puno manje osjetljiv na promjene, jer pad napona U_{GS} dovodi do povećanja struje I_D , a povećanje I_D dovodi do pada napona U_{GS} i obrnuto.

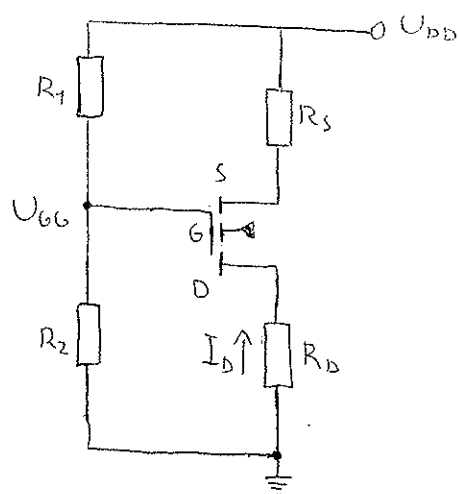
- Na taj način se sklop opire promjeni

- Manja osjetljivost se "vidi" i grafčki jer radni pravac više nije okomit



* podešavanje statičke radne točke s p-kanalnim MOSFET-om

- ovako izgleda sklop:



$$U_{DD} - U_{GS} = -R_S I_D$$

$$U_{DD} = U_{DS} - (R_D + R_S) \cdot I_D$$

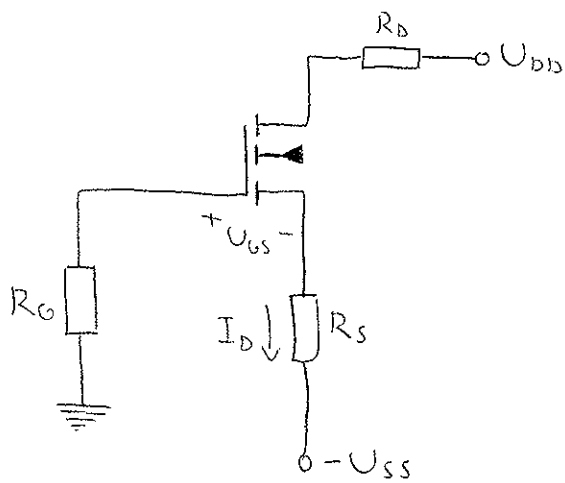
⇓

$$U_{DS} = -U_{DD} - (R_D + R_S) \cdot I_D$$

- samo smo obrnuli visoke (napajanje)
i niske (masa) potencijale

* podešavanje statičke radne točke s dva napona napajanja

- imamo dva napona napajanja - pozitivni (U_{DD}) i negativni (U_{SS})



$$-U_{SS} = -U_{GS} - R_S I_D$$

$$U_{SS} = U_{GS} + R_S I_D$$

$$U_{DS} = U_{DD} + U_{SS} - (R_S + R_D) \cdot I_D$$

DOSAD SMO SE BAVILI
ISTOSMJERNIM KOMPONENTAMA
SIGNALA - STATIČKA ANALIZA
DRUGI DIO PRORAČUNA SE
PROVODI ZA IZMJENIČNE
KOMPONENTE SIGNALA -
DINAMIČKA ANALIZA !!!

* OSNOVNI SPOJEVI POJAČALA S FET-ovima

- svaki spoj pojačala se sastoji od otpornika, kondenzatora, MOSFET-a, generatora signala (U_g), napona napajanja (U_{DS})
- bitni su nam ulazni ($U_{VL} = U_{GS}$) i izlazni napon ($U_{VZ} = U_{DS}$)
- pretpostavke:

STATIČKA ANALIZA:

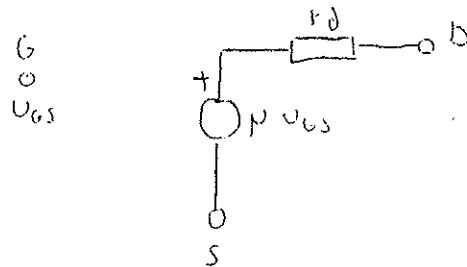
- na mjestima kondenzatora su prekidi kruga

DINAMIČKA ANALIZA

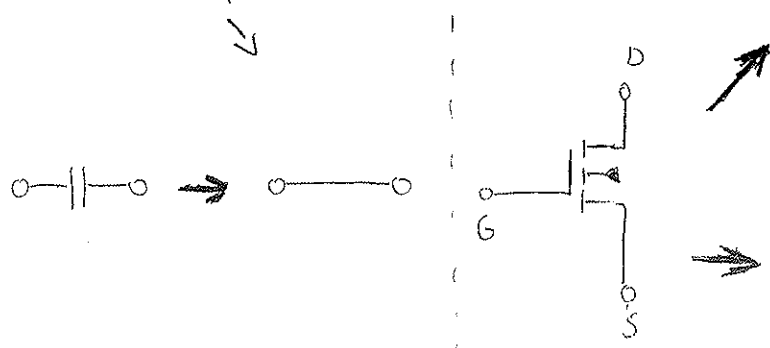
- frekvencija izmjenične komponente je dovoljno visoka da impedanciju kapaciteta možemo zanemariti, tj. na mjestima kondenzatora su kratki spojevi
- istosmjerni napon napajanja je jednak nuli, tj. uzemljen je
- MOSFET nadomjestimo strujnim / naponskim izvorom i dinamičkim otporom (r_d)

NAPOMENA - pojačalo se koristi u području zasićenja ($i_D = \frac{K}{2}(U_{GS} - U_{GS0})^2$)

STATIKA



DINAMIKA

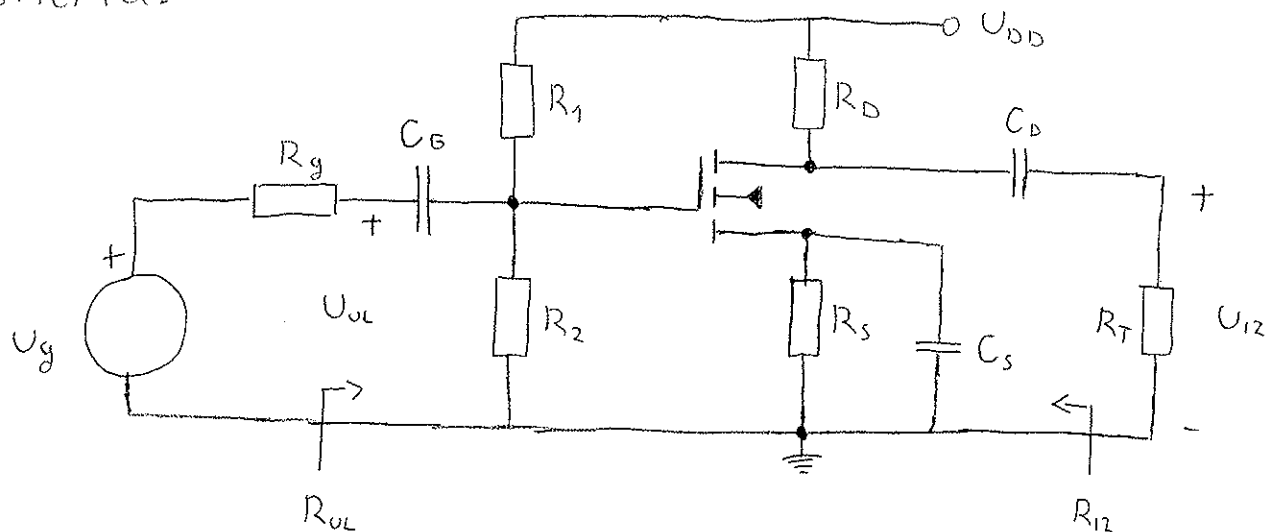


U_{GS}

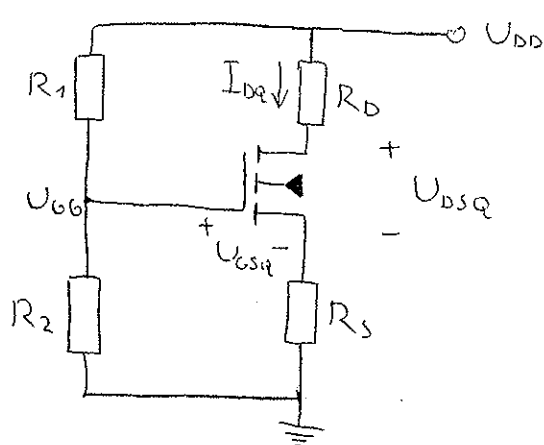
r_D u paraleli

• POJAČALO U SPOJU ZAJEDNIČKOG UVODA

- shema:



- shema za statičku analizu:

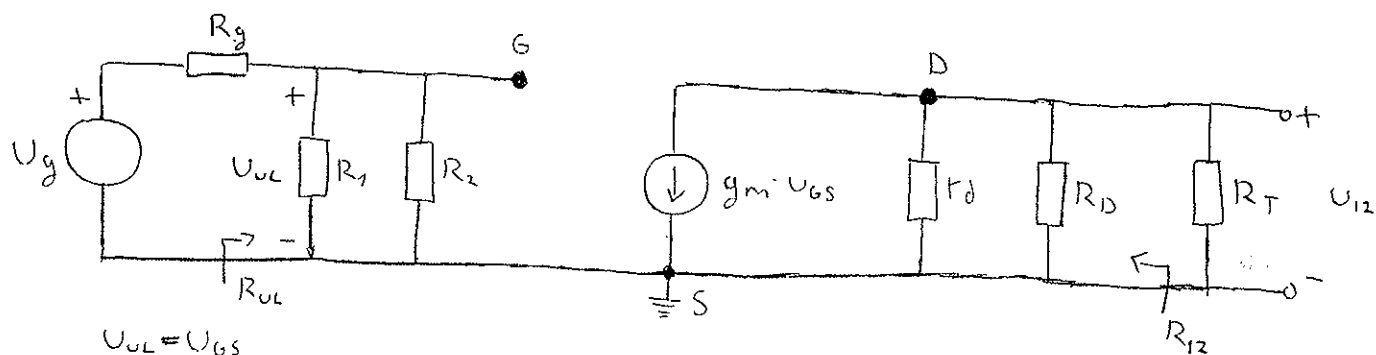


$$U_{GG} = U_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{GSQ} = U_{GG} - R_S \cdot I_{DQ}$$

$$U_{DSQ} = U_{DD} - (R_D + R_S) \cdot I_{DQ}$$

- shema za dinamičku analizu



$$U_{UL} = U_{GS}$$

$$U_{12} = U_{DS}$$

$$A_V = \frac{U_{12}}{U_{UL}} = -g_m \cdot (r_d \parallel R_D \parallel R_T)$$

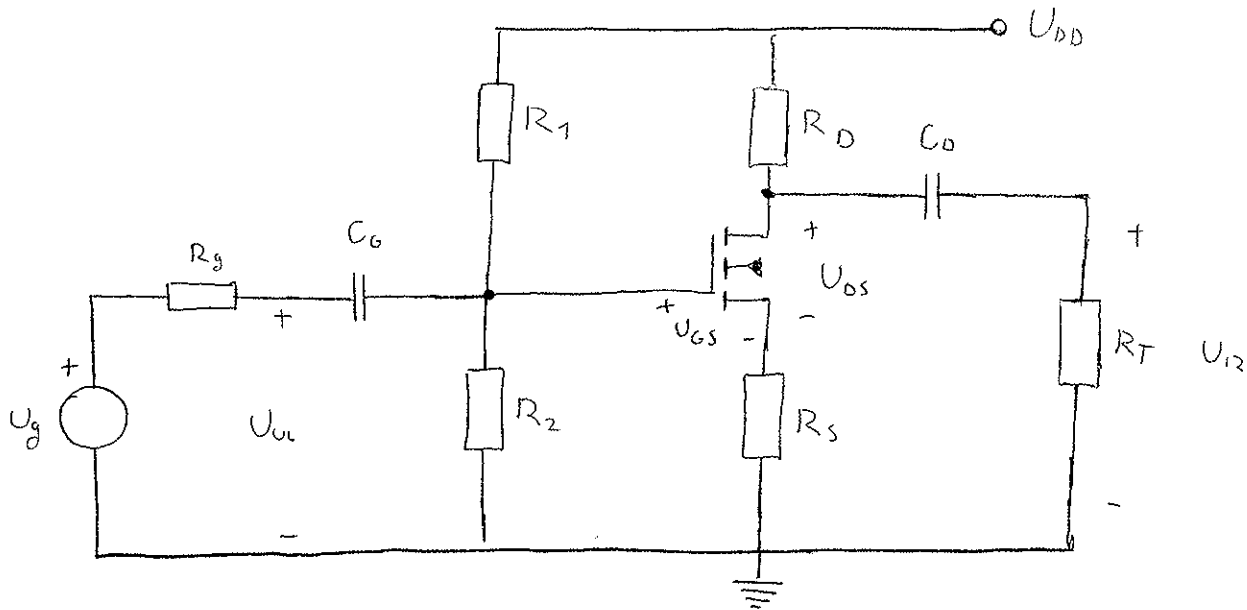
$$A_{Vg} = \frac{U_{12}}{U_g} = A_V \cdot \frac{(R_1 \parallel R_2)}{R_g + (R_1 \parallel R_2)}$$

$$R_{UL} = R_1 \parallel R_2$$

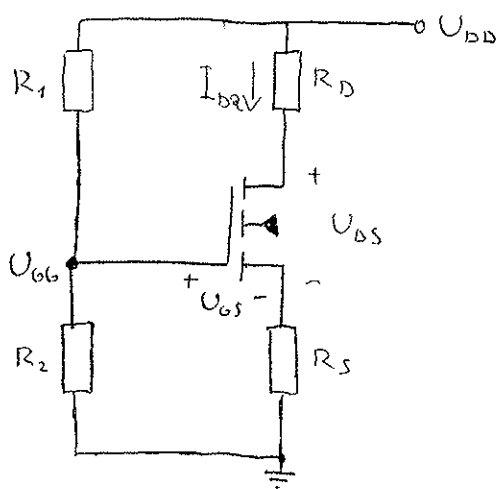
$$R_{12} = r_d \parallel R_D$$

• POJAČALO U SPOJU ZAJEDNIČKOG UVODA S UVODSKOM DEGENERACIJOM

- shema



- shema za statičku analizu

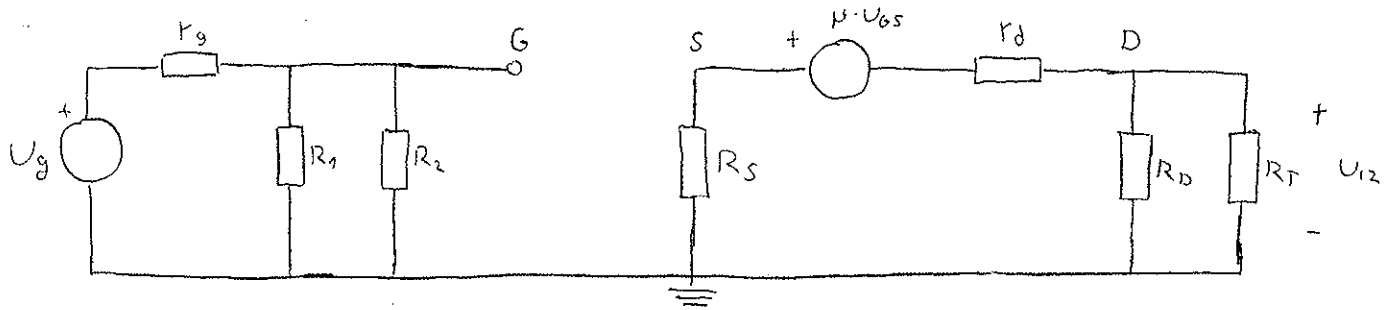


$$U_{GG} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{DD}$$

$$U_{GSQ} = U_{GG} - R_S \cdot I_{DQ}$$

$$U_{DSQ} = U_{DD} - (R_D + R_S) \cdot I_{DQ}$$

- shema za dinamičku analizu



$$\mu \cdot U_{GS} = (R_S + r_d + R_D \parallel R_T) \cdot i_d$$

$$U_{12} = -(R_D \parallel R_T) \cdot i_d$$

$$R_{UL} = R_1 \parallel R_2$$

$$U_{GS} = U_{UL} - R_S \cdot i_d$$

$$A_V = \frac{-\mu (R_D \parallel R_T)}{(1 + \mu) R_S + r_d + R_D \parallel R_T}$$

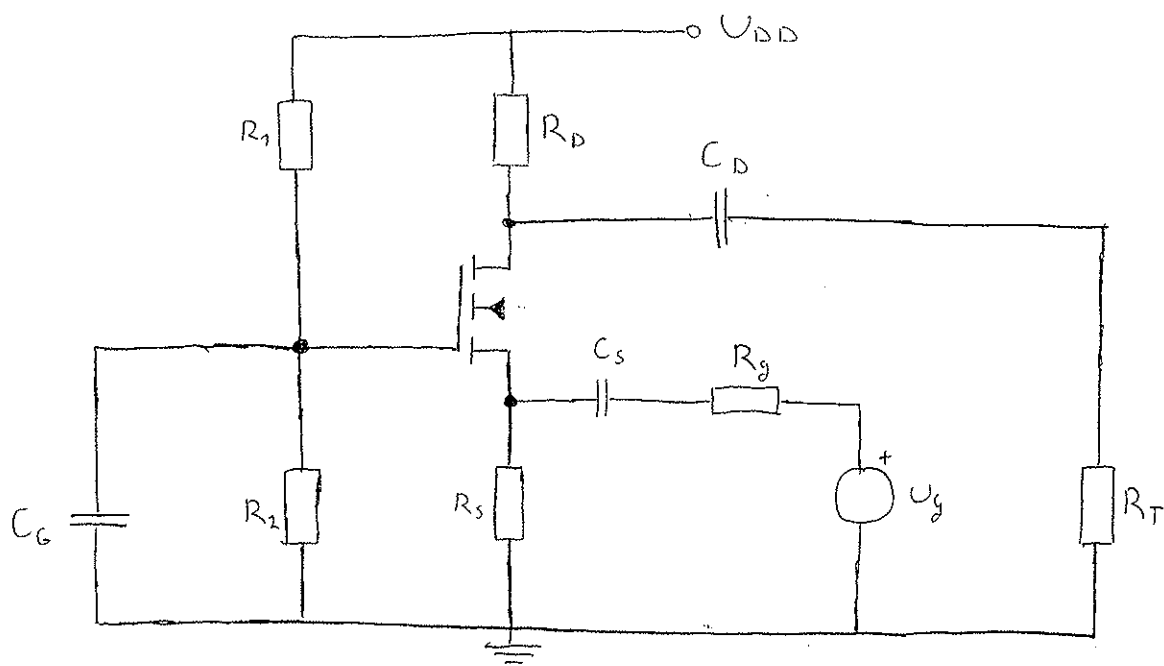
$$R_{12} = R_D \parallel [(1 + \mu) R_S + r_d]$$

$$\mu \cdot U_{UL} = [(1 + \mu) R_S + r_d + R_D \parallel R_T] \cdot i_d$$

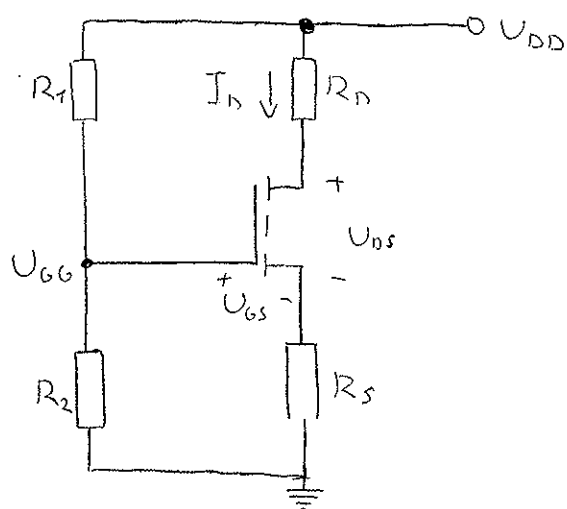
$$A_V \approx - \frac{R_D \parallel R_T}{R_S}$$

• POJAČALO U SPOJU ZAJEDNICKE UPRAVLJAČKE ELEKTRODE

- shema



- shema za statičku analizu

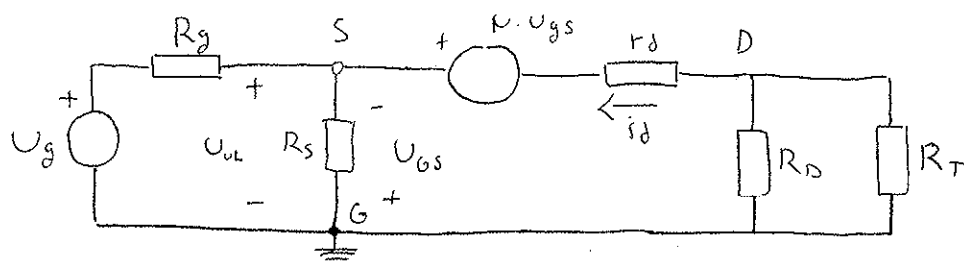


$$U_{GG} = U_{DD} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{GSQ} = U_{GG} - R_S I_{DQ}$$

$$U_{DSQ} = U_{DD} - (R_D + R_S) \cdot I_D$$

- shema za dinamičku analizu



$$U_{GS} = -U_{UL}$$

$$(1 + \mu) U_{UL} = - (r_d + R_D \parallel R_T) \cdot i_d$$

$$U_{L2} = - (R_D \parallel R_T) \cdot i_d$$

$$A_V = \frac{(1 + \mu)(R_D \parallel R_T)}{r_d + R_D \parallel R_T}$$

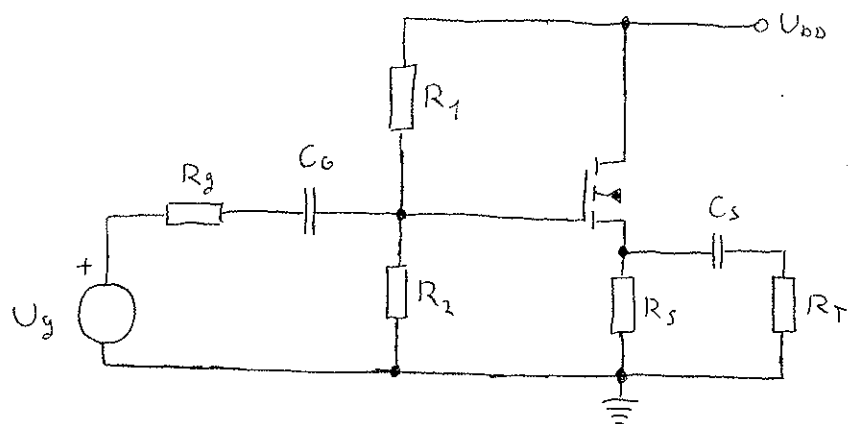
$$R_{UL} = R_S \parallel \frac{r_d + R_D \parallel R_T}{1 + \mu} \approx R_S \parallel \frac{1}{g_m}$$

$$A_V \approx g_m (r_d \parallel R_D \parallel R_T)$$

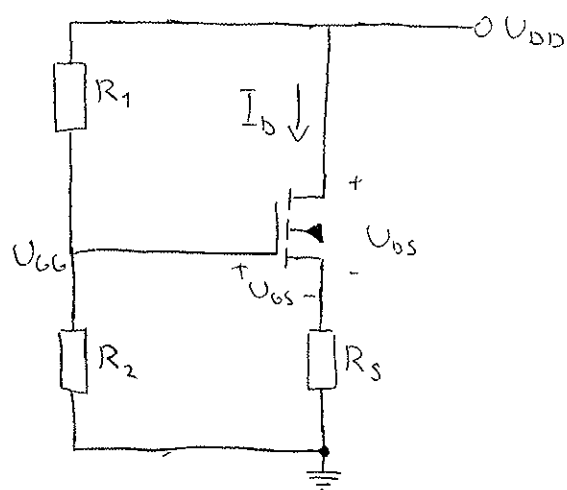
$$R_{L2} = R_D \parallel [r_d + (1 + \mu)(R_S \parallel R_g)]$$

• POJAČALO V SPOJU ZAJEDNIČKOG ODVODA (UVODSKO STUPNILO)

- shema



- shema za statičku analizu

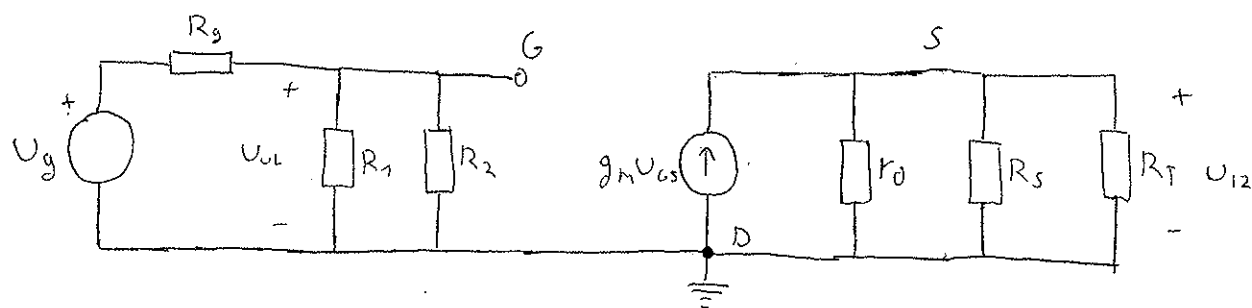


$$U_{GG} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{DD}$$

$$U_{GSQ} = U_{GG} - R_S \cdot I_D$$

$$U_{DSQ} = U_{DD} - R_D \cdot I_D$$

- shema za dinamičku analizu:



$$U_{12} = g_m \cdot U_{GS} (r_o \parallel R_S \parallel R_T)$$

$$U_{GS} = U_{UL} - U_{12}$$

$$R_{12} = R_S \parallel \frac{r_o}{1 + \mu} \approx R_S \parallel \frac{1}{g_m}$$

$$A_V = \frac{g_m (r_o \parallel R_S \parallel R_T)}{1 + g_m (r_o \parallel R_S \parallel R_T)}$$

$$R_{UL} = R_1 \parallel R_2$$

• usporedba osnovnih spojeva pojačala s FET-om

SPOJ POJAČALA	ZAJEDNIČKI UVOD	ZAJEDNIČKI UVOD S UVODSKOM DEGENERACIJOM	ZAJEDNIČKA UPRAVLJAČKA ELEKTRODA	ZAJEDNIČKI ODVOD
NAPONSKO POJAČANJE	- negativno naponsko pojačanje - veće od jedan po iznosu	- negativno naponsko pojačanje - veće od jedan (manje nego bez degeneracije)	- pozitivno naponsko pojačanje - veće od jedan (po iznosu jednako uvodskom)	- pozitivno naponsko pojačanje - manje od jedan
A_v	$-g_m(r_d \parallel R_D \parallel R_T)$	$\frac{-\mu(R_D \parallel R_T)}{(1+\mu)R_S + r_d + R_D \parallel R_T}$	$g_m(r_d \parallel R_D \parallel R_T)$	$\frac{g_m(r_d \parallel R_S \parallel R_T)}{1 + g_m(r_d \parallel R_S \parallel R_T)}$
ULAZNI OTPOR R_{UL}	- velik ulazni otpor $R_1 \parallel R_2$	- velik ulazni otpor $R_1 \parallel R_2$	- mali ulazni otpor $R_S \parallel \frac{1}{g_m}$	- veliki ulazni otpor $R_1 \parallel R_2$
IZLAZNI OTPOR R_{IZ}	- ovisi o R_D $R_D \parallel r_d$	- velik izlazni otpor $R_D \parallel [r_d + (1+\mu)(R_S \parallel R_g)]$	- velik izlazni otpor $R_D \parallel [r_d + (1+\mu)(R_S \parallel R_g)]$	- mali izlazni otpor $R_S \parallel \frac{1}{g_m}$

- koje nadomjesne sheme MOSFETA koristimo (strujni ili naponski ovisan izvor)?

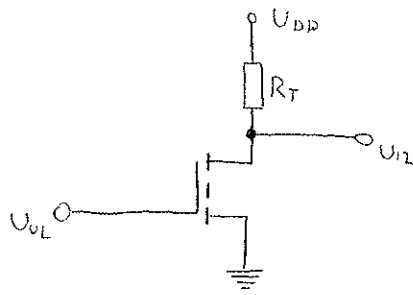
ZAJEDNIČKI UVOD - strujni

ZAJEDNIČKI UVOD S UVODSKOM DEGENERACIJOM - naponski

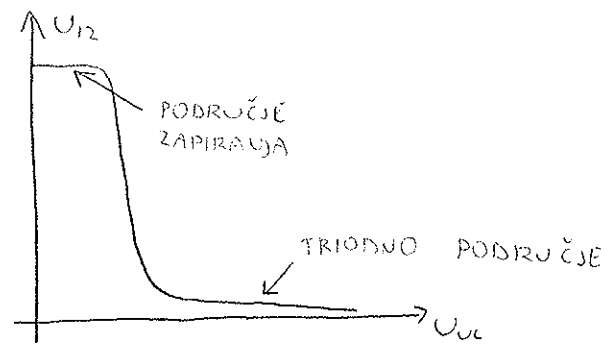
ZAJEDNIČKA UPRAVLJAČKA ELEKTRODA - naponski

ZAJEDNIČKI ODVOD - strujni

* MOSFET INVERTOR

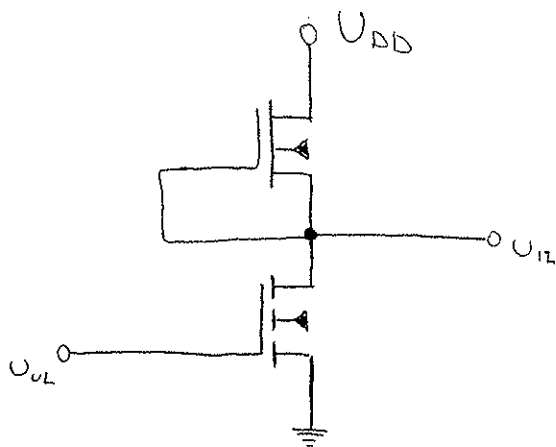


SKLOP INVERTORA



PRIJENOSNA KARAKTERISTIKA

- kad sklop koristimo kao sklopku (digitalna elektronika), koristimo područje zapiranja i triodno područje (za razliku od pojačala, koje koristi područje zasićenja)
- kad je na ulazu visoki napon, na izlazu je niski i obrnuto - sklop se ponaša kao invertor
- u integriranim sklopovima se, zbog manjih dimenzija, umjesto otpornika, koristi još jedan tranzistor (takav sklop je ekvivalentan prethodnom)

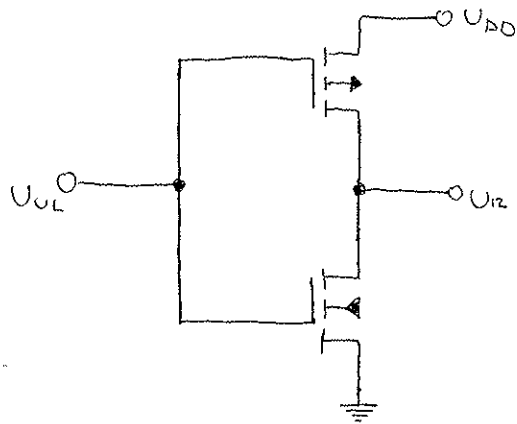


- ovakva tehnologija je zastarjela, jer sklop u stacionarnom stanju (visoki ulazni napon) troši snagu
- rješenje, koje ne troši snagu u stacionarnom stanju, je CMOS sklop

* CMOS inverter

- Complementary MOS

- sastoji se od nMOS-a i pMOS-a

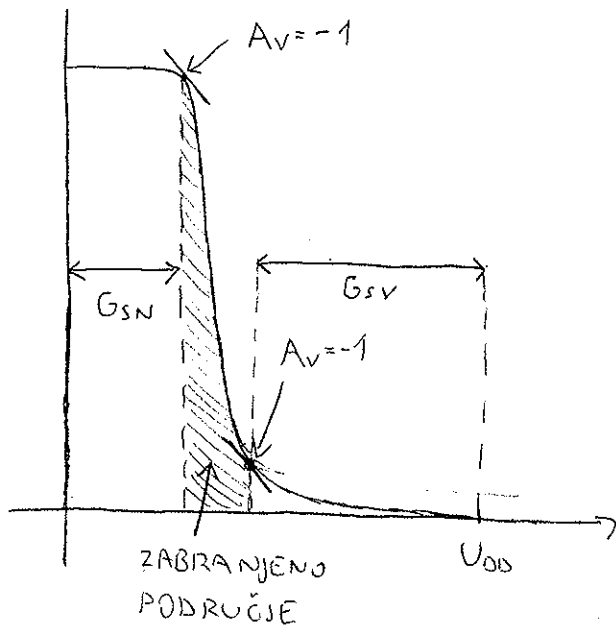


- obogaćeni tranzistori

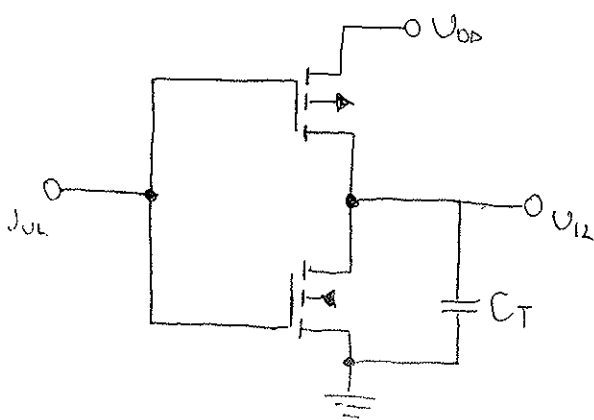
- nema potrošnje snage u stacionarnom stanju

• granice smetnji

- raspon ulaznog napona u kojem "smijemo" biti



* disipacija snage



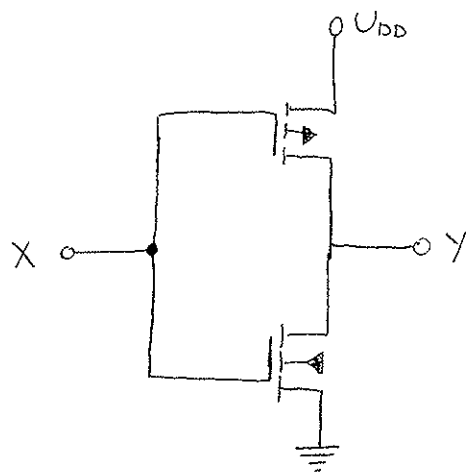
- CMOS disipira snagu pri prijelaznim stanjima:

$$P = C_T \cdot U_{DD}^2 \cdot f$$

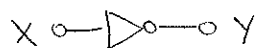
* CMOS logički sklopovi (kombinacijski)

- CMOS logičkim sklopovima ostvarujemo logičke funkcije
- kombinacijski sklopovi - izlaz ovisi samo o ulazu
 - nemaju svojstvo pamćenja
- svaki sklop se sastoji od dva dijela - dio s nMOS-ovima i p-MOS-ovima
- ta dva dijela rade komplementarno - kad nMOS vodi, njegov komplementarni pMOS ne vodi struju
- dio s nMOS-ovima je spojen na masu i zove se mreža ponora (pull-down network)
- dio s pMOS-ovima je spojen na napajanje i zove se mreža izvora (pull-up network)

• INVERTOR



simbol:

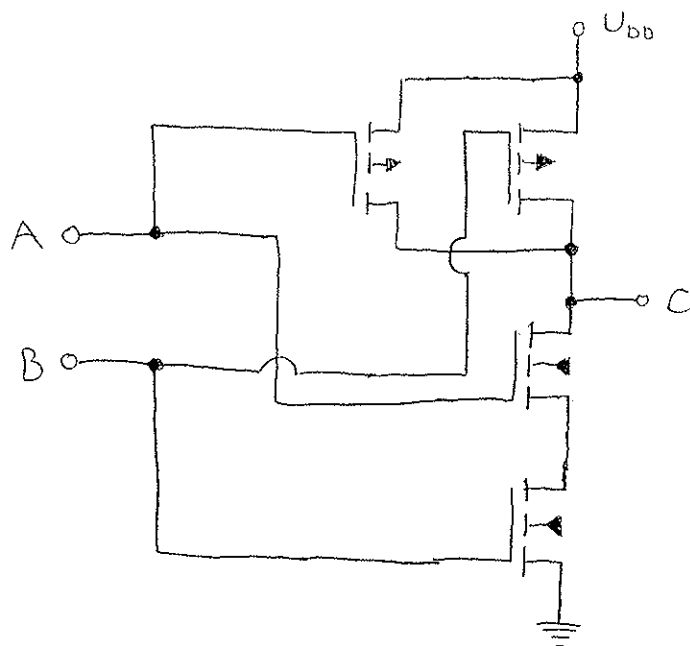


inverter obavlja funkciju:

$$Y = \bar{X}$$

X	Y
0	1
1	0

• SKLOP NI



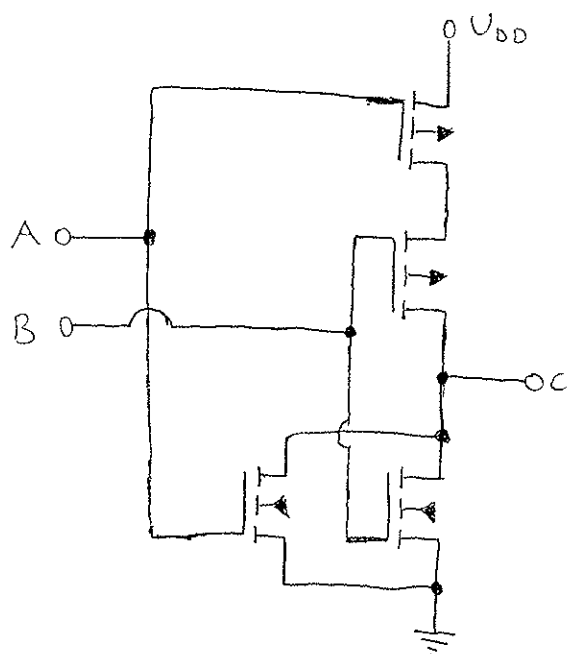
simbol



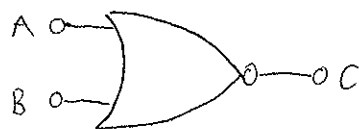
funkcija: $C = \overline{A \cdot B}$

A	B	C
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

• SKLOP NILI



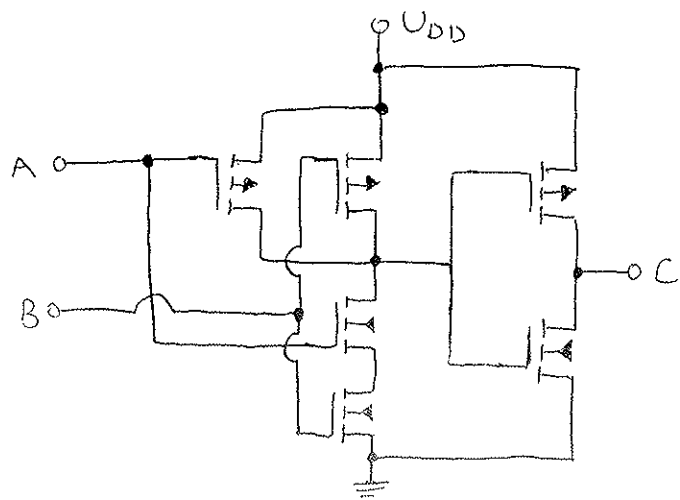
simbol:



funkcija: $C = \overline{A + B}$

A	B	C
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

- da bi dobili funkcije I i ILI, na izlaz dodamo inverter



- primjer za sklop I

- NI i inverter daju sklop I

- simbol

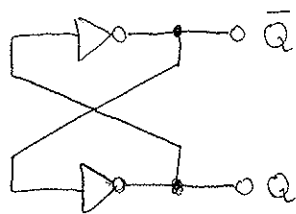


- funkcija $A \cdot B = C$

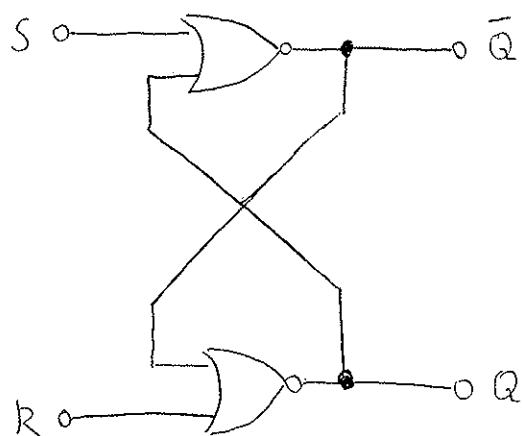
A	B	C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

* CMOS bistabil

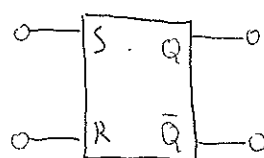
- osnovni sekvencijski sklop - ima svojstvo pomnjenja
- izlaz ovisi o ulazu i prethodnom stanju sklopa
- osnovni spoj bistabila



- izvedba SR bistabila s NLI sklopovima



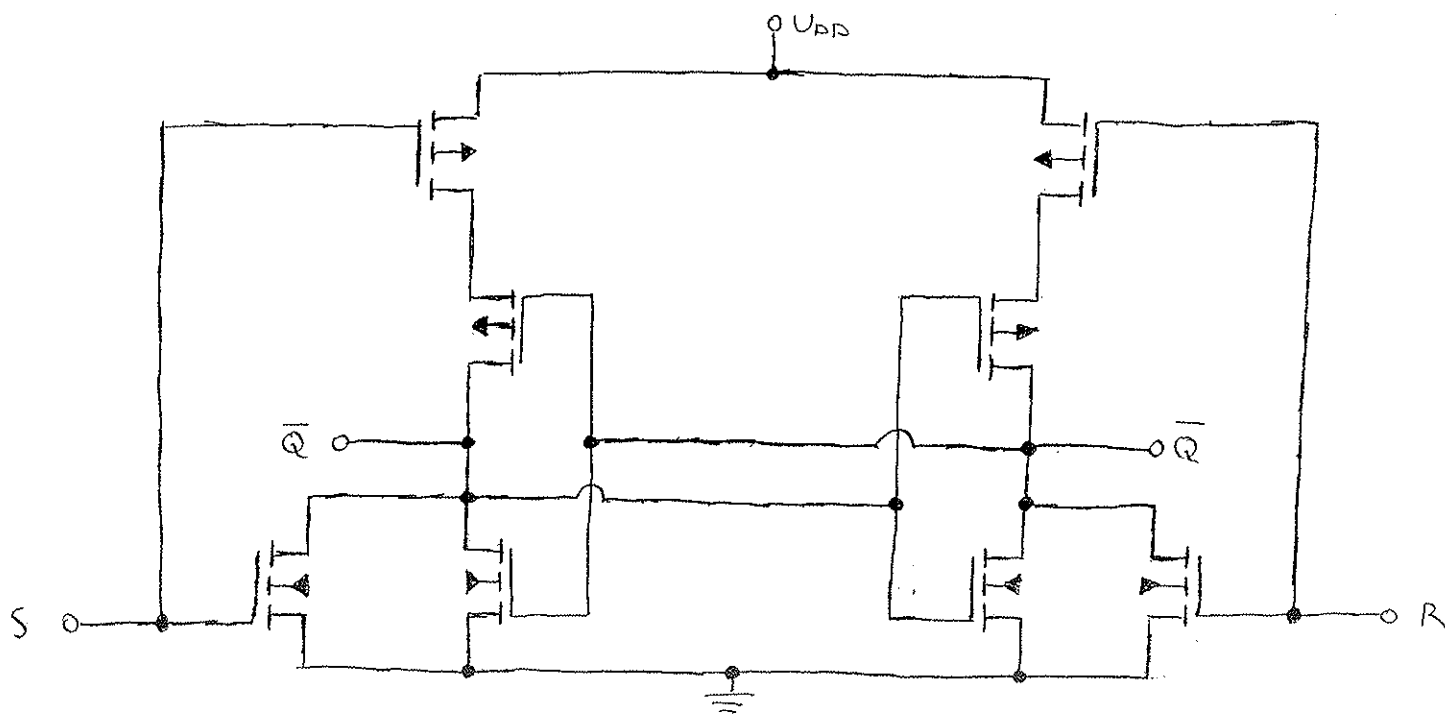
simbol:



funkcija

S	R	Q_{n+1}	\bar{Q}_{n+1}
0	0	Q_n	\bar{Q}_n
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	-	-

- shema SR-bistabila s tranzistorima



7. BIPOLARNI TRANZISTORI

- kao i unipolarni tranzistor, ima 3 priključka - ulazni, izlazni i zajednički
- glavna razlika između unipolarnog i bipolarnog tranzistora - unipolarni temelji svoj rad na vođenju struje jednog tipa nosilaca, dok bipolarni koristi oba tipa nosilaca
- prednosti - veće pojačanje
 - veća strujna sposobnost
 - veća brzina rada

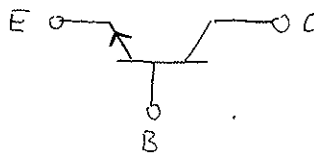
* STRUKTURA BIPOLARNOG TRANZISTORA (nnp)

- troslojna struktura - dva sloja n-tipa odvojena slojem p-tipa
- 3 priključka - emiter, baza, kolektor

- shematski prikaz:

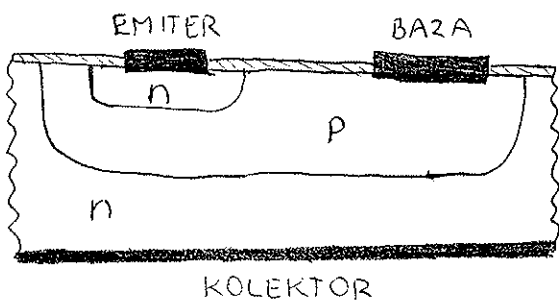


- električki simbol:

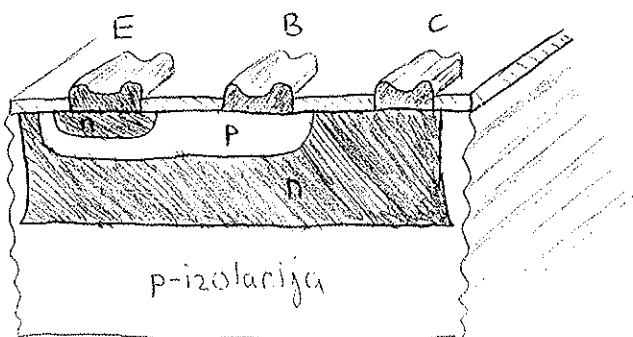


- tehnološki prikaz:

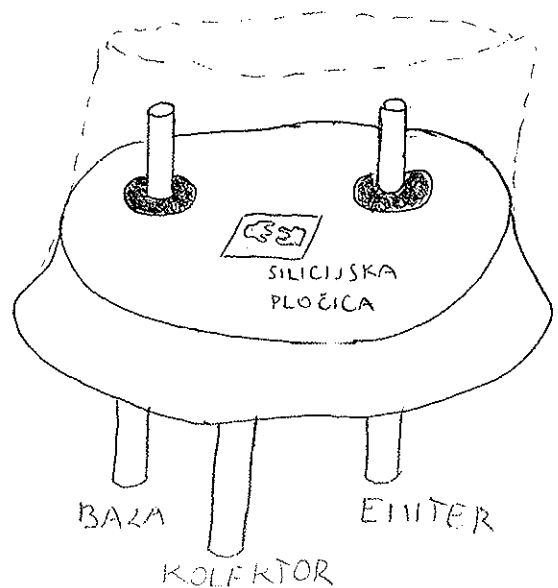
DISKRETNI:



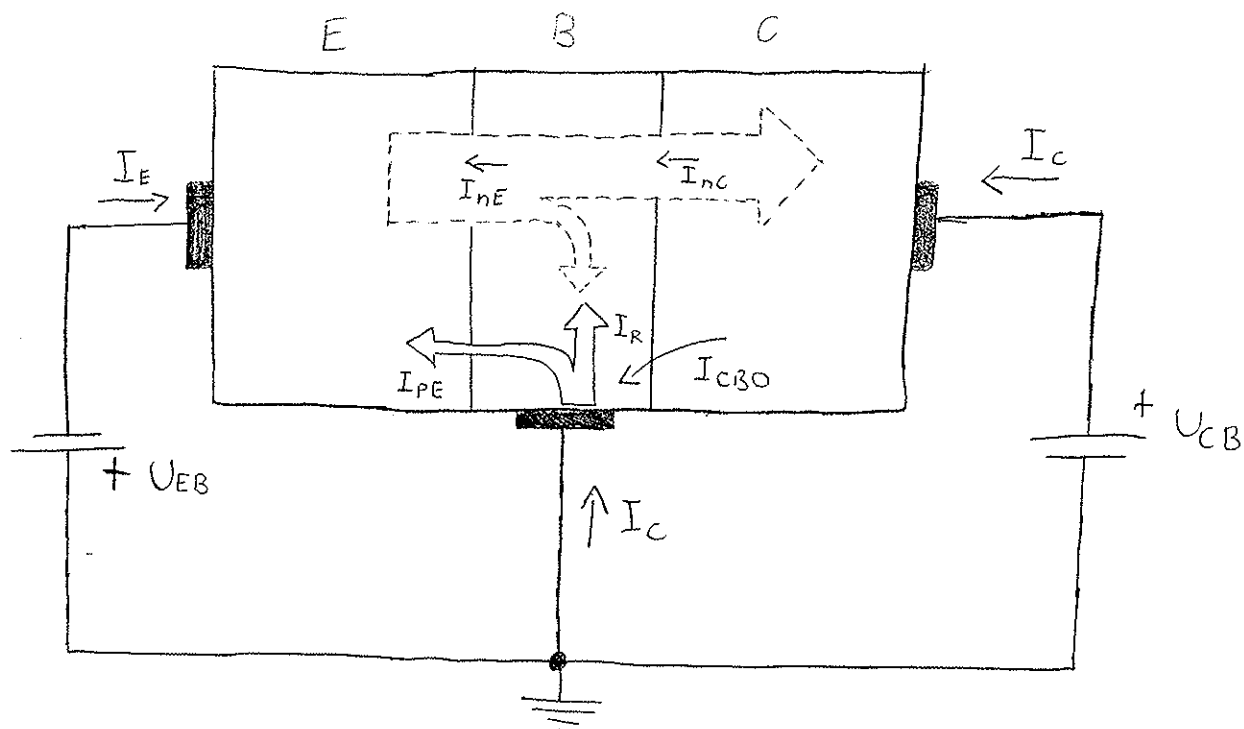
INTEGRIRANI:



- diskretni tranzistor montiran u metalnom kućištu



* OPIS RADA BIPOLARNOG TRANZISTORA (npn)



- napon U_{EB} propusno polarizira spoj emiter baza, a napon U_{CB} zaporno polarizira spoj kolektor baza

- zbog propusne polarizacije C-B spoja, emiter injektira elektrone u bazu, a baza šupljine u emiter - rezultat su emitorske struje elektrona (stvarni smjer elektrona je označen isprekidanom strelicom, a struja teče u suprotnom smjeru)

i šupljina: $I_E = -I_{nE} - I_{pE}$ - teku iz tranzistora, što znači

da I_E ima negativan predznak

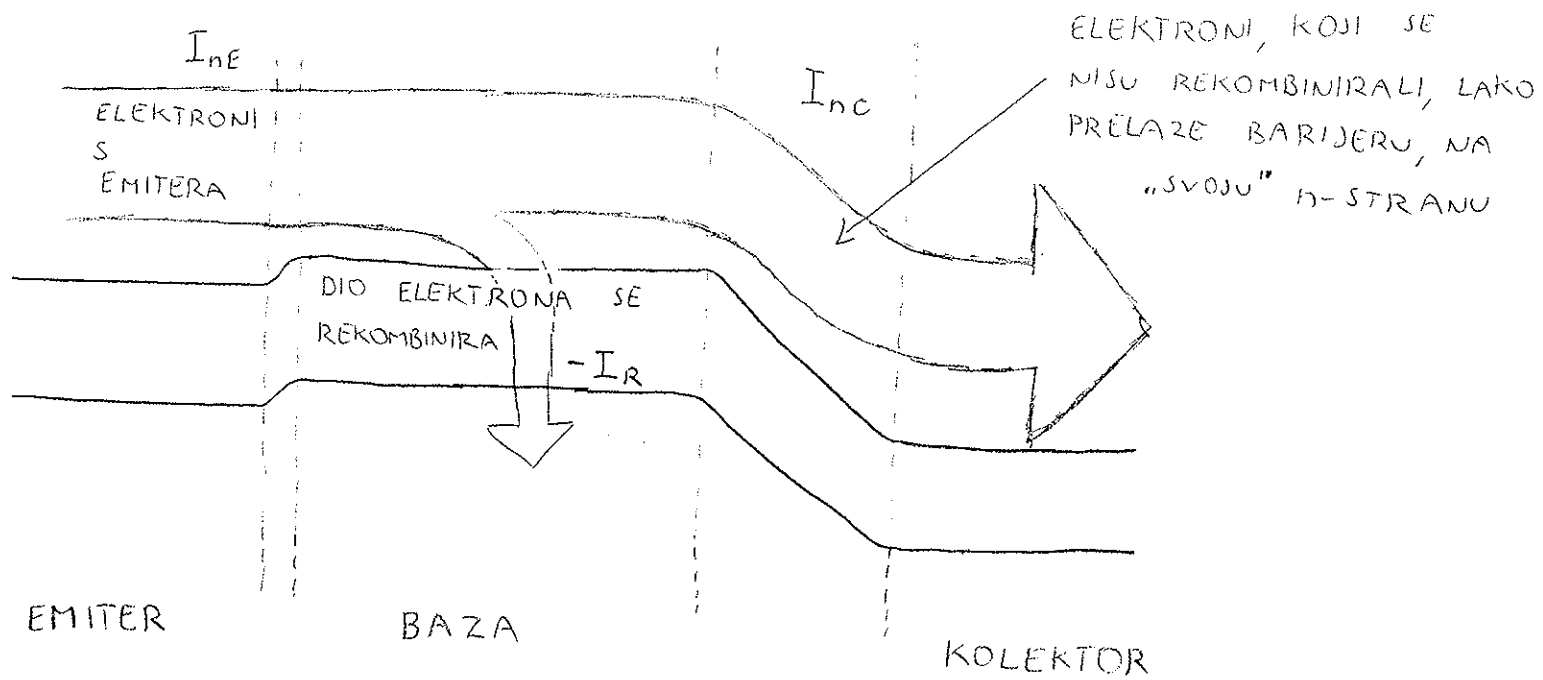
- I_{pE} i I_{nE} su, u uvjetima niske injekcije, difuzijske struje

- kada elektroni injekcijom dođu u bazu, koja je p-tipa, oni rekombiniraju s većinskim šupljinama, ali ipak određen broj elektrona „preživi“ i dođe do spoja baza-kolektor

= „preživjeli“ elektroni „ne vide“ barijeru zaporno polariziranog spoja

C-B, pa je struja I_{nC} relativno velika

- ovako izgleda energetski dijagram:



- I_R je rekombinacijska struja koja "nadoknađuje" manjak šupljina u bazi, nestalih rekombinacijom
- na zaporno polariziranom spoju kolektor-baza također teče mala struja zasićenja I_{CBO}
- kolektorska struja se sastoji od struje "preživjelih" elektrona i male struje zasićenja
- struja baze se sastoji od šupljinske emitterske struje, rekombinacijske struje i struje zasićenja C-B spoja
- emitterska struja ima šupljinsku komponentu
- sada možemo zapisati struje sva tri priključka

$$I_E = -I_{PE} - I_{nE} \Rightarrow -I_E = I_{PE} + I_{nE}$$

$$I_C = I_{nC} + I_{CBO}$$

$$I_B = I_{PE} + I_R - I_{CBO}$$

• negativni predznaci znače da struja izlazi iz sklopa, a pozitivni da ulazi u sklop

- prethodno opisan spoj bipolarnog tranzistora, je spoj zajedničke baze i radi u normalnom aktivnom području
- tranzistor je to bolji što više emitorskih elektrona stigne do spoja kolektor-baza
- te osobine se izražavaju sljedećim faktorima:

*FAKTOR INJEKCIJE, TRANSPORTNI FAKTOR I FAKTOR STRUJNOG POJAČANJA

- faktor injekcije (efikasnost emitera) γ je udio elektronske komponente u emitorskoj struji:

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{np}} = \frac{I_{nE}}{-I_E}$$

- za dobar tranzistor γ teži prema 1, a to se postiže jakim dopiranjem emitera

- transportni faktor β^* definira se kao omjer struje manjinskih elektrona koji su stigli do kolektora i struje manjinskih elektrona koji su izašli iz emitera:

$$\beta^* = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = 1 - \frac{I_R}{I_{nE}}$$

- dobar β se postiže što užom bazom

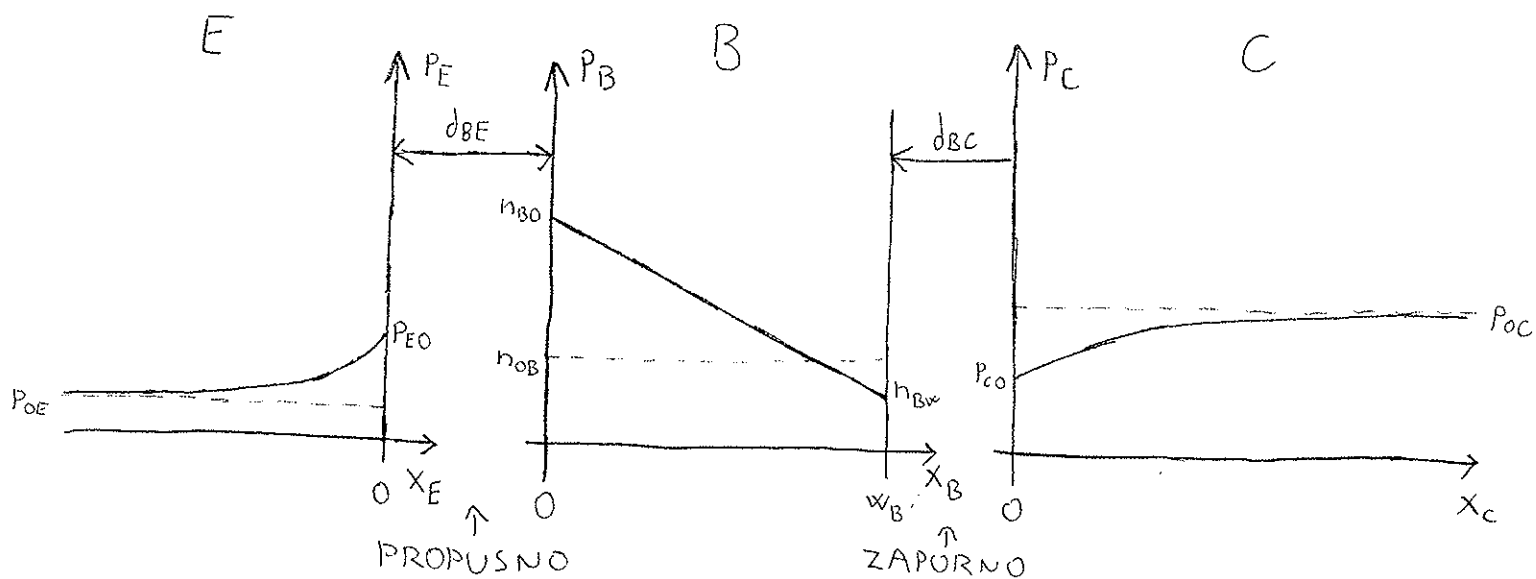
- koristeći prethodna dva izraza, dobili smo: $I_C = -\gamma \cdot \beta I_E - I_{CBO}$

- statički faktor strujnog pojačanja spoja zajedničke baze α definiran je kao $\alpha = \gamma \cdot \beta^*$ i uz zanemarenje struje zasićenja I_{CBO} (uz $U_{CB} = 0$ i $I_{CBO} = 0$) iznosi:

$$\alpha = \frac{I_C}{-I_E}$$

* ODREĐIVANJE KOMPONENTI STRUJA

- raspodjela manginskih nosilaca npn tranzistora u normalnom aktivnom području rada



- određene komponente struja određujemo kao difuzijske
- emiter je najjače, a kolektor najslabije dopitan ($N_{DE} > N_{AB} > N_{DC}$)
- baza je uska, a emiter i kolektor široki ($w_B \ll L_{nB}, w_C \gg L_{pC}, w_E \gg L_{nE}$)
- w_B - efektivna širina baze
- P_{OE}, n_{OB}, p_{OC} - ravnotežne koncentracije
- P_{EO}, n_{BO}, p_{CO} - rubne koncentracije

$$n_{BO} = n_{OB} \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$$

$$P_{EO} = P_{OE} \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$$

$$n_{BW} = n_{OB} \cdot \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right)$$

$$P_{CO} = P_{OC} \cdot \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right)$$

RUBNE KONCENTRACIJE

- raspodjela koncentracije u emiteru je eksponencijalna
- raspodjela u bazi je praktički linearna

• raspodjela koncentracija i struja

$$n_B(x_B) = n_{BW} + (n_{BO} - n_{BW}) \frac{w_B - x_B}{w_B} \quad - \text{linearna raspodjela}$$

$$P_E(x_E) = P_{OE} + (P_{EO} - P_{OE}) \cdot \exp\left(\frac{x_E}{L_{PE}}\right) \quad - \text{eksponencijalna raspodjela}$$

$$I_{nE} = Q \cdot S \cdot D_{nB} \frac{n_{BO} - n_{BW}}{w_B}$$

$$n_{OB} = \frac{n_i^2}{N_{AB}}$$

$$I_{pE} = Q \cdot S \cdot D_{pE} \frac{P_{EO} - P_{OE}}{L_{pE}}$$

$$P_{OE} = \frac{n_i^2}{N_{DE}}$$

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{1}{1 + \frac{D_{pE} \cdot w_B \cdot N_{AB}}{D_{nB} \cdot L_{pE} \cdot N_{DE}}}$$

- faktor injekcije

$$n_B(x_B) = n_{BW} + (n_{BO} - n_{BW}) \cdot \frac{\text{sh}\left(\frac{w_B - x_B}{L_{nB}}\right)}{\text{sh}\left(\frac{w_B}{L_{nB}}\right)}$$

$$I_{nE} = Q \cdot S \cdot D_{nB} \frac{n_{BO} - n_{BW}}{L_{nB}} \frac{\text{ch}\left(\frac{w_B}{L_{nB}}\right)}{\text{sh}\left(\frac{w_B}{L_{nB}}\right)}$$

$$I_{nC} = Q \cdot S \cdot D_{nB} \frac{n_{BO} - n_{BW}}{L_{nB}} \frac{1}{\text{sh}\left(\frac{w_B}{L_{nB}}\right)}$$

} elektronske struje emitera i kolektora

$$\beta^* = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = \frac{1}{\text{ch}\left(\frac{w_B}{L_{nB}}\right)} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w_B}{L_{nB}}\right)^2$$

• NAKRČANI NABOJ MANJINSKIH NOSILACA U BAZI

$$Q_{nB} \approx Q \cdot S \cdot \frac{n_{BO} \cdot w_B}{2} \quad - \text{nakrčani naboj}$$

$$I_R = I_{nE} - I_{nC} = I_{nE}(1 - \beta)$$

$$\frac{Q_{nB}}{I_{nE}} = \frac{w_B^2}{2 D_{nB}} = t_{tr} \quad - \text{vrijeme proleta}$$

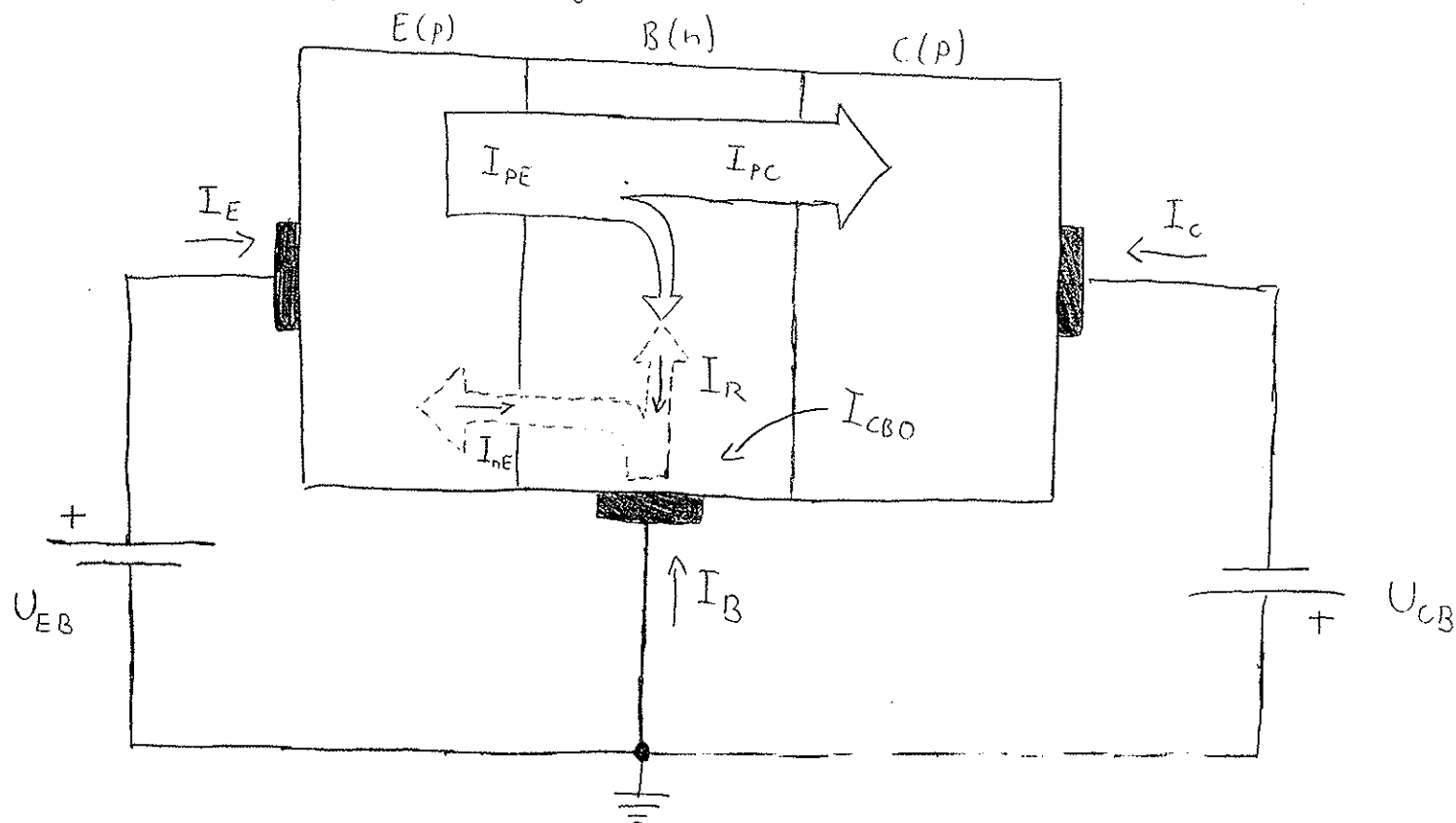
$$= Q \cdot S \cdot D_{nB} \frac{n_{BO}}{w_B} \frac{w_B^2}{2 L_{nB}^2} =$$

$$= Q \cdot S \cdot \frac{n_{BO} \cdot w_B}{2 \gamma_{nB}}$$

$$\frac{Q_{nB}}{I_R} = \gamma_{nB}, \quad \frac{I_R}{I_{nE}} = \gamma_{nB}$$

* BIPOLARNI pnp TRANZISTOR

- isti princip rada kao i kod npn tranzistora, samo uz zamijenjene tipove primjesa
- suprotni smjerovi struja



$$I_E = I_{PE} + I_{nE}$$

$$I_C = -\alpha \cdot I_E + I_{CBO}$$

$$I_C = -I_{PC} + I_{CBO}$$

$$Q_{PB} \approx Q \cdot S \cdot \frac{P_{B0} \cdot w_B}{2}$$

$$I_R = I_{nE} - I_{PC}$$

$$I_{PE} \approx Q \cdot S \cdot D_{PB} \cdot \frac{P_{B0}}{w_B}$$

$$I_B = -I_{nE} - I_R - I_{CBO}$$

$$I_R = I_{PE} - I_{PC} = I_{PE} (1 - \beta) = Q \cdot S \cdot \frac{P_{B0} \cdot w_B}{2 \gamma_{PB}}$$

$$\gamma = \frac{I_{PE}}{I_{PE} + I_{nE}} = \frac{1}{1 + \frac{D_{nE} \cdot w_B \cdot N_{0B}}{D_{PB} \cdot L_{nE} \cdot N_{0E}}}$$

$$\frac{Q_{PB}}{I_{PE}} = \frac{w_B^2}{2 D_{PB}} = t_{tr}$$

$$\beta^* = \frac{I_{PC}}{I_{PE}} = 1 - \frac{I_R}{I_{PE}} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w_B}{L_{PB}} \right)^2$$

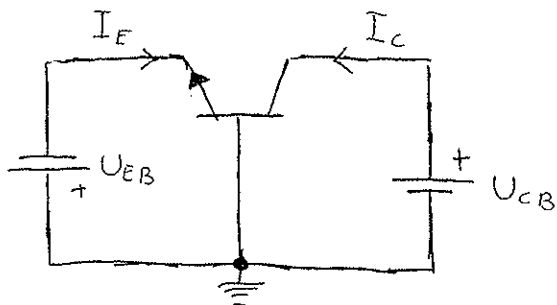
$$\frac{Q_{PB}}{I_R} = \gamma_{PB}$$

*SPOJEVI BIPOLARNOG TRANZISTORA

SPOJ	ULAZNA PRIKLJUČNICA	ULAZNA STRUJA	ULAZNI NAPON	IZLAZNA PRIKLJUČNICA	IZLAZNA STRUJA	IZLAZNI NAPON
ZAJEDNIČKA BAZA	emiter	I_E	U_{EB}	kolektor	I_C	U_{CB}
ZAJEDNIČKI EMITER	baza	I_B	U_{BE}	kolektor	I_C	U_{CE}
ZAJEDNIČKI KOLEKTOR	baza	I_B	U_{BC}	emiter	I_E	U_{EC}

- spojevi i polarizacije za normalno aktivno područje rada:

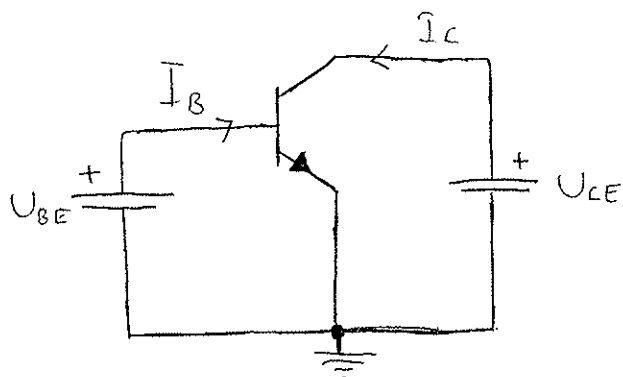
• SPOJ ZAJEDNIČKE BAZE



$$I_C = -\alpha I_E + I_{CBO}$$

$$\alpha = \frac{I_C}{-I_E}$$

• SPOJ ZAJEDNIČKOG EMITERA



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

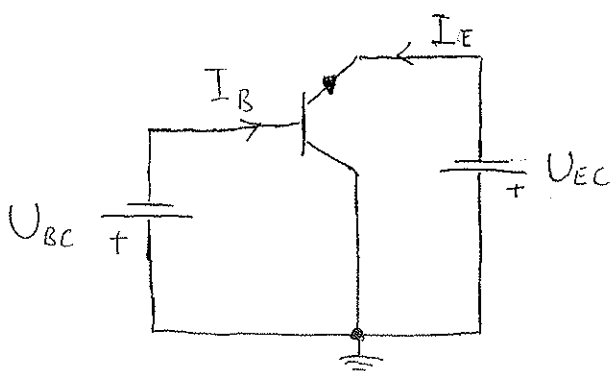
$$I_C = -\alpha \cdot I_E + I_{CBO} = -\alpha(-I_B - I_C) + I_{CBO}$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} = \beta \cdot I_B + I_{CEO}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

β -STATIČKI FAKTOR STRUJNOG POJAČANJA SPOJA ZAJEDNIČKOG EMITERA

• SPOJ ZAJEDNIČKOG KOLEKTORA



$$|U_{EC}| > |U_{BC}|$$

$$I_E = -I_C - I_B = -(\beta + 1)I_B - I_{CEO}$$

$$\beta + 1 = \frac{-I_E}{I_B}$$

• Struje zasićenja

- struje zasićenja nalazimo na zaporno polariziranim spojevima

- iz izraza:

$$I_C = -\alpha \cdot I_E + I_{CBO}$$

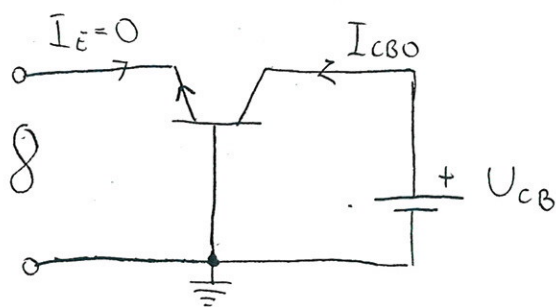
$$I_C = \beta \cdot I_B + I_{CEO}$$

možemo dobiti struje zasićenja ako eliminiramo I_E i I_B

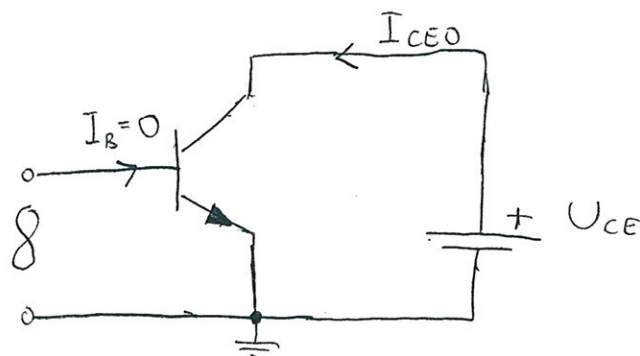
- To znači da moramo odspojiti emiter, tj. bazu;

$$I_{CBO} = I_C \quad \text{uz} \quad I_E = 0$$

$$I_{CEO} = I_C \quad \text{uz} \quad I_B = 0$$



ZAJEDNIČKA BAZA



ZAJEDNIČKI EMITER

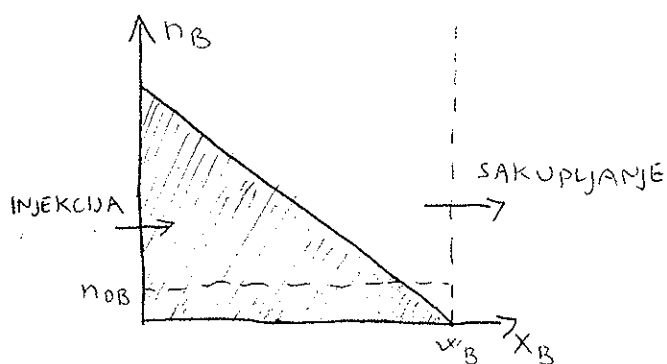
$$I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha} = (1 + \beta) I_{CBO}$$

* PODRUČJA RADA BIPOLARNOG TRANZISTORA

POLARIZACIJE		EMITER - BAZA	
PN-SPOJEVA		propusno	zaporno
KOLEKTOR - BAZA	propusno	zasićenje	inveržno-aktivno
	zaporno	normalno-aktivno	zupiranje

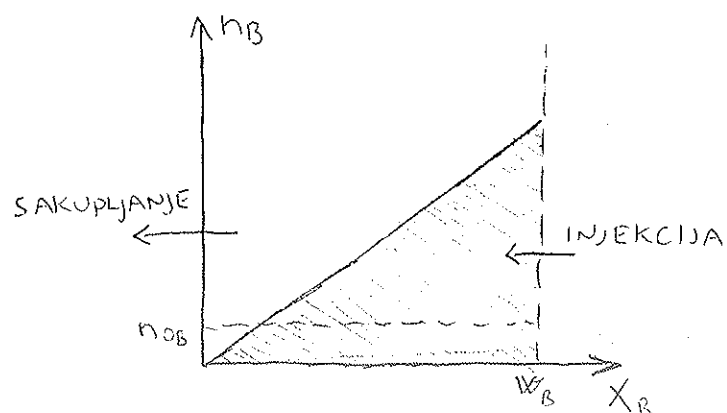
• NORMALNO AKTIVNO PODRUČJE

- spoj emiter-baza je propusno polariziran, a spoj kolektor-baza zaporno
- emiter injektira elektrone u bazu i elektroni, koji ne rekombiniraju u bazi, dolaze do spoj kolektor-baza
- struja kolektora ovisi o struji emitera
- emiter je jako dopiran (dominantna elektronska struja), a baza je uska (malo elektrona rekombinira), pa je razlika između emitterske i kolektorske struje neznatna
- tranzistor ima svojstvo pojačanja
- na kolektoru se ponaša kao idealni strujni izvor
- na zapornom polariziranom spoju napon možemo mijenjati napon u širokim granicama, dok na propusno polariziranom spoju mala promjena uzrokuje veliku promjenu kolektorske struje
- raspodjela manjinskih elektrona u bazi:



• INVERZNO AKTIVNO PODRUČJE

- isto kao i kod aktivnog, uz zamjenu uloga emitera i kolektora

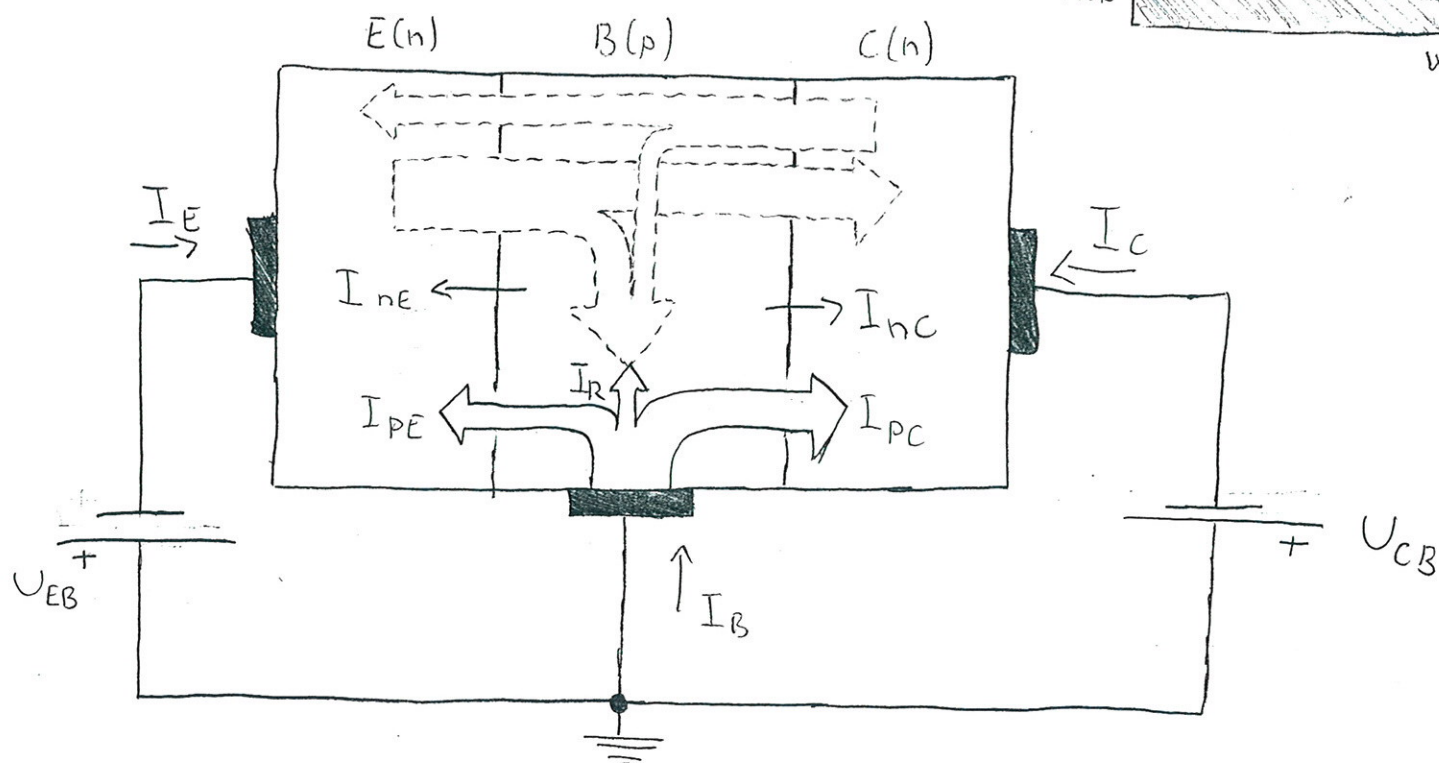
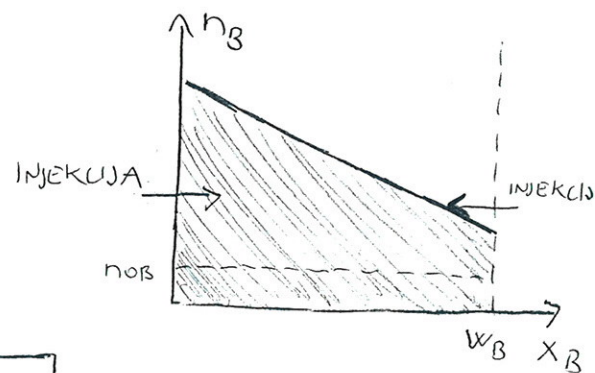


$$\alpha = \frac{I_E}{-I_C}$$

$$\beta = \frac{I_E}{I_R} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

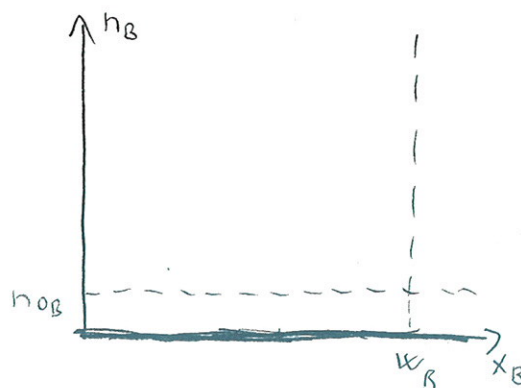
• PODRUČJE ZASIĆENJA

- propusno polarizirana oba spoja
- ovo područje rada možemo opisati kao superpoziciju rada normalnom i inverznom aktivnom području
- oba spoja injektiraju nosioce na drugu stranu, zbog čega je baza zasićena manjinskim nosiocima (otud i naziv)
- ovisno o konstrukciji tranzistora i priključenim naponima, prevladava injekcija jednog spoja
- nema pojačanja
- mali ulazni i izlazni otpor



• PODRUČJE ZAPIRANJA

- zaporno polarizirana oba spoja
- teku samo male struje zasićenja
- nema pojačanja
- veliki ulazni i izlazni otpori



* STRUJNO-NAPONSKE KARAKTERISTIKE

- ulazne karakteristike - ovisnost ulazne struje o ulaznom naponu

- izlazne karakteristike - ovisnost izlazne struje o izlaznom naponu

- ove karakteristike se crtaju za spojeve zajedničke baze i zajedničkog emitera

• MODULACIJA ŠIRINE BAZE - EARLYJEV EFEKT

- stara pretpostavka - struja kroz zaporno polariziran C-B spoj ne ovisi o vrijednosti zapornog napona

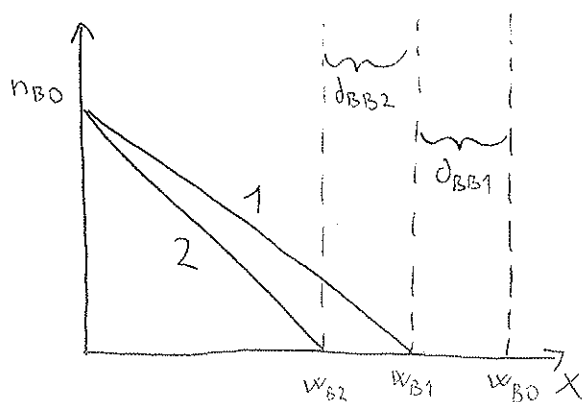
- ipak, ta struja ovisi o tom naponu

- povećanjem zapornog napona, širi se osiromašeno područje spoja kolektor-baza te dolazi do suženja kvazineutralnih područja, tj. do suženja baze - MODULACIJA ŠIRINE BAZE (EARLYJEV EFEKT)

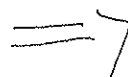
- promjene na propusno polariziranom spoju emiter-baza možemo zanemariti

- povećanjem zapornog napona s U_{CB1} na U_{CB2} , povećala se i širina osiromašenog područja (na strani baze) s δ_{BB1} na δ_{BB2} , što znači da se efektivna širina baze smanjila s w_{B1} na w_{B2}

- w_{B0} - tehnološka širina baze (udaljenost između pn-spojeva)



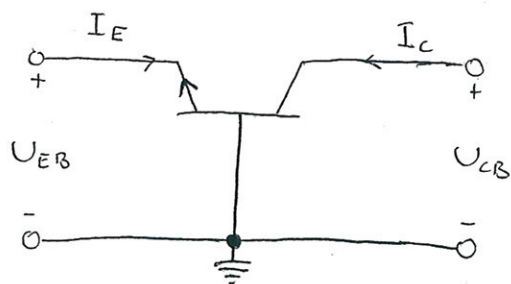
- ovo uzrokuje promjene nekih struja



- suženje baze dovodi do porasta gradijenta koncentracije elektrona, tj. do porasta struje I_{nE} , a time i struje I_{nC}
- zbog suženja baze, manje elektrona se rekombinira, pa je manja i rekombinacijska struja I_R
- I_{PE} i I_{CBO} se ne mijenjaju

EARLYJEV EFEKT \Rightarrow $\begin{cases} I_{nE}, I_{nC}, \uparrow \text{ raste} \\ I_R \downarrow \text{ pada} \\ I_{PE}, I_{CBO} = \text{ostaje jednaka} \end{cases}$

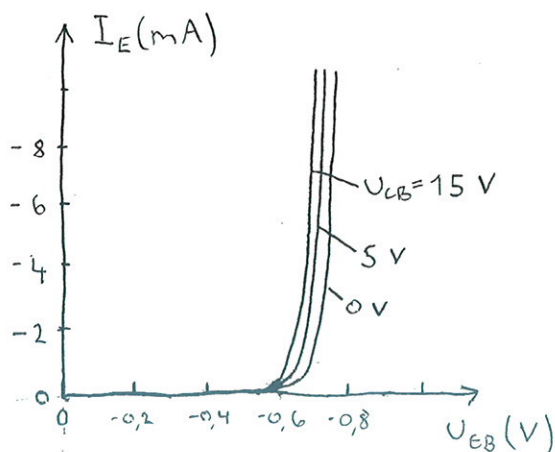
• SPOJ ZAJEDNIČKE BAZE



- ULAZNE KARAKTERISTIKE

- ovisnost ulazne emitorske struje o ulaznom naponu emiter-baza uz konstantni izlazni napon kolektor-baza:

$$I_E = f(U_{EB}) |_{U_{CB} = \text{konst.}}$$

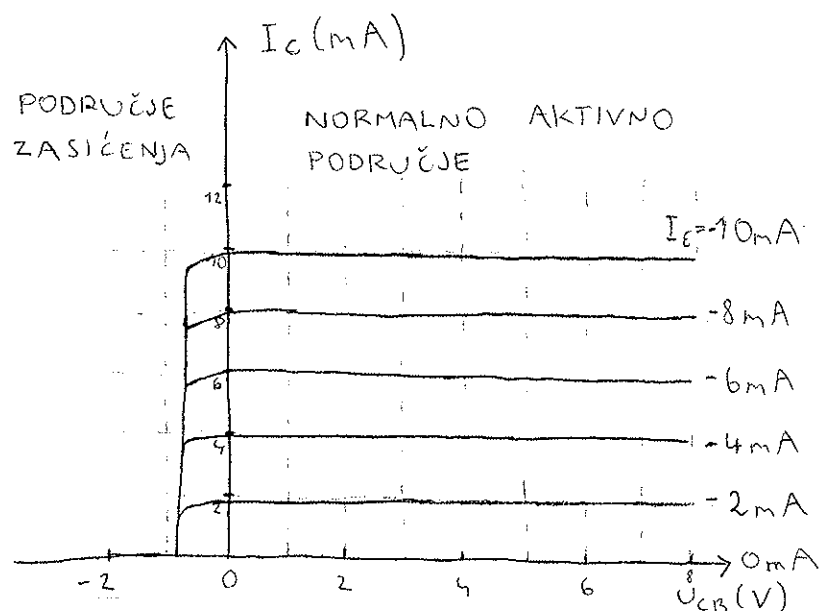


- normalno aktivno područje (spoj C-B je zaporno polariziran)
- karakteristika kao i kod pn-diode
- porast napona U_{CB} pomiče graf ulijevo

- IZLAZNE KARAKTERISTIKE

- ovisnost izlazne kolektorske struje o izlaznom naponu kolektor-baza, uz konstantnu ulaznu emittersku struju

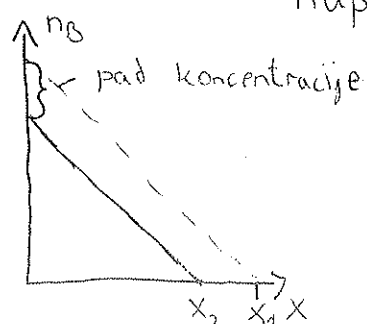
$$I_c = f(U_{CB}) \mid I_E = \text{konst.}$$



- u normalnom aktivnom području (zaporno polariziran spoj kolektor-baza, tj. $U_{CB} > 0$) kolektorska struja I_c je praktički jednaka emitterskoj struji (suprotan pređenak, uz $\alpha \rightarrow 1$), $-I_E = I_c$

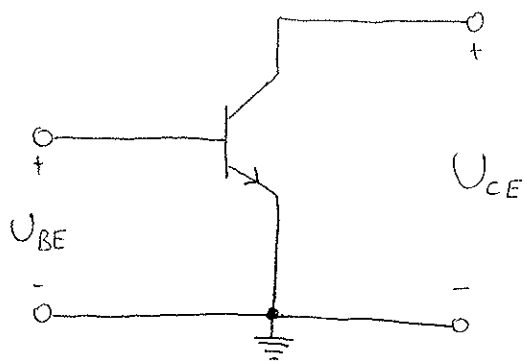
- kada je napon U_{CB} manji od $-0,7\text{V}$, spoj kolektor-baza je propusno polariziran i tranzistor je u zasićenju
- struja I_c ipak lagano raste s porastom U_{CB} zbog Earlyjevog efekta

- Karakteristike se crtaju za konstantnu struju I_E , koja je praktički jednaka difuzijskoj elektronskoj komponenti emitterske struje, tj. $-I_E \approx I_{nE}$. Znači da gradijent mora ostati isti - ako je uća baza, i rubna koncentracija elektrona mora biti manja, a to postizemo smanjenjem napona U_{EB}



→ također se smanjuje I_R i I_B , dok I_c raste

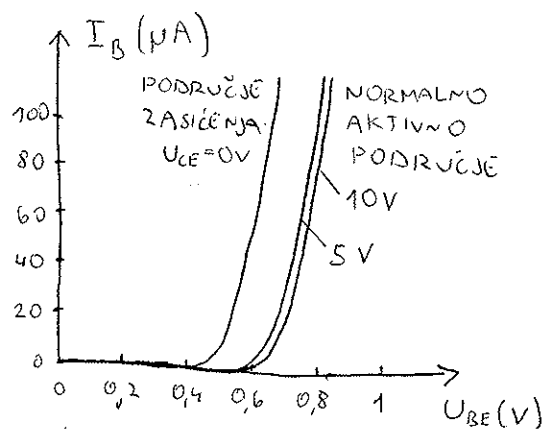
• SPOJ ZAJEDNIČKOG EMITERA



- ULAZNE KARAKTERISTIKE

- ovisnost ulazne bazne struje o ulaznom naponu baza-emiter uz konstantan napon kolektor-emiter:

$$I_B = F(U_{BE}) \Big|_{U_{CE} = \text{konst.}}$$



- u normalnom aktivnom području spoj E-B je propusno polariziran i struja I_B eksponencijalno ovisi o U_{BE}

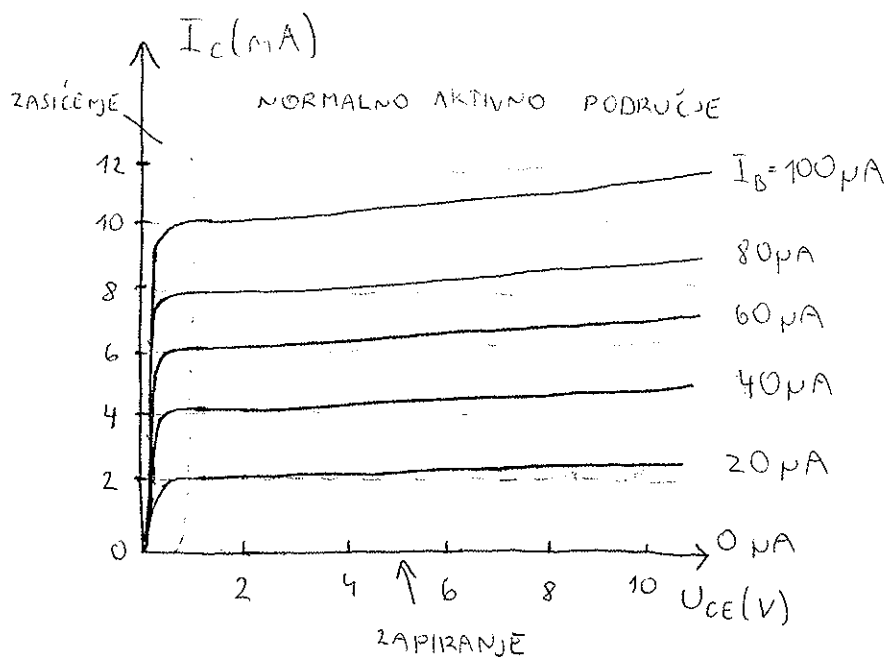
- za $U_{CE} = 0$, oba su spoja propusna i tranzistor je u zasićenju, a I_B je velika zbog injekcija nosilaca s obe strane

- IZLAZNE KARAKTERISTIKE

- ovisnost izlazne kolektorske struje o izlaznom naponu kolektor-emiter, uz konstantnu ulaznu baznu struju
- kada je $U_{CE} > U_{BE}$, spoj kolektor baza je zaporno polariziran, a pozitivna struja I_B propusno polarizira spoj emiter-baza i tranzistor je u normalnom aktivnom području \Rightarrow

$$I_C = \beta \cdot I_B + I_{CEO} \approx \beta I_B$$

$$I_C = F(U_{CE}) \mid U_{BE} = \text{konst.}$$



- izlazna struja raste
brže nego kod spoja
zajedničke baze

- porastom napona U_{CE} , raste i napon zaporne polarizacije, te dolazi do suženja baze
- struja baze je konstantna ($I_B = I_{PE} + I_R$)
- porastom U_{CE} , raste i rubna koncentracija nosilaca p_{EO} , a time raste i I_{PE} .
- rekombinacijska struja raste s porastom rubne koncentracije n_{BO} , a smanjuje se sa širinom baze
- da bi I_B održali konstantnom, moramo povećati n_{BO} , odnosno U_{BE}
- time smo povećali emitorsku (zbog povećanja I_{NE}), a time i kolektorsku struju
- uz $I_B = 0$, tranzistor je u području zapiranja
- tranzistor ulazi u zasićenje uz pozitivni napon $U_{CE} = U_{BE}$
- karakteristike pnp-tranzistora su analogne karakteristikama npn-tranzistora, uz promjenu predznaka napona i struja

* DINAMIČKI PARAMETRI I MODEL BIPOLARNOG TRANZISTORA

- koristiti ćemo linearni model za režim malog signala
- definirat ćemo ga za spoj zajedničkog emitera

• DINAMIČKI OTPORI

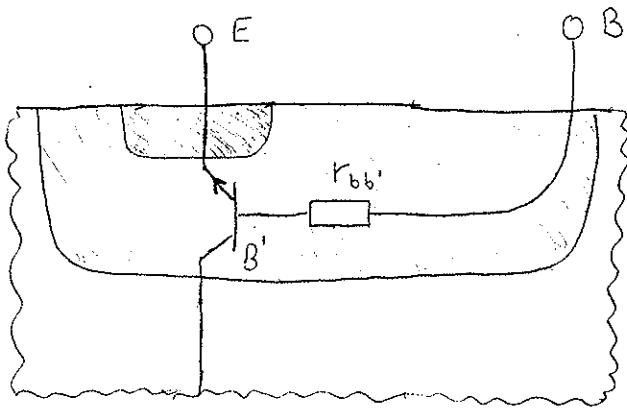
- ulazni dinamički otpor

$$r_{be} = \left. \frac{\partial U_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{CE} = \text{konst.}}$$

- izlazni dinamički otpor

$$r_{ce} = \left. \frac{\partial U_{CE}}{\partial i_c} \right|_{i_B = \text{konst.}}$$

- uz dinamički otpor propusno polariziranog spoja, ulazni dinamički otpor r_{be} sadrži i serijski otpor baze $r_{bb'}$:



$$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e}$$

$$r_{b'e} = \frac{U_T}{I_B}$$

- struja kolektora

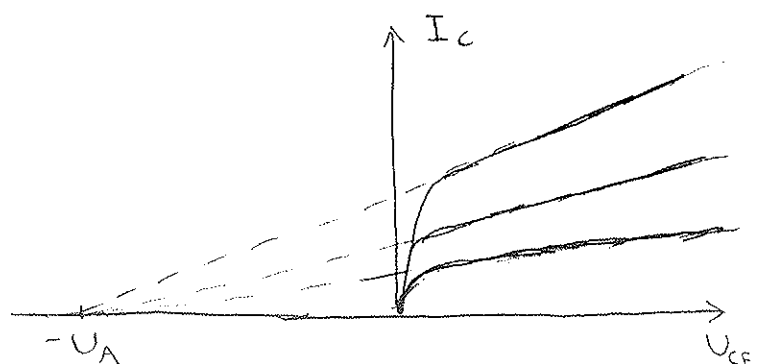
$$i_c = \beta i_B \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_A} \right) \leftarrow \text{zbog Earlyjevog efekta}$$

$$\frac{1}{r_{ce}} = \frac{\partial i_c}{\partial U_{CE}} = \frac{i_c}{U_{CE} + U_A}$$

\Downarrow

$$r_{ce} = \frac{U_{CE} + U_A}{I_C} \approx \frac{U_A}{I_C}$$

- EARLYJEV NAPON U_A



• POJAČANJA

- dinamički faktor strujnog pojačanja

$$h_{fe} = \left. \frac{di_c}{di_B} \right|_{U_{CE} = \text{konst.}}$$

$$h_{fe} \approx \beta$$

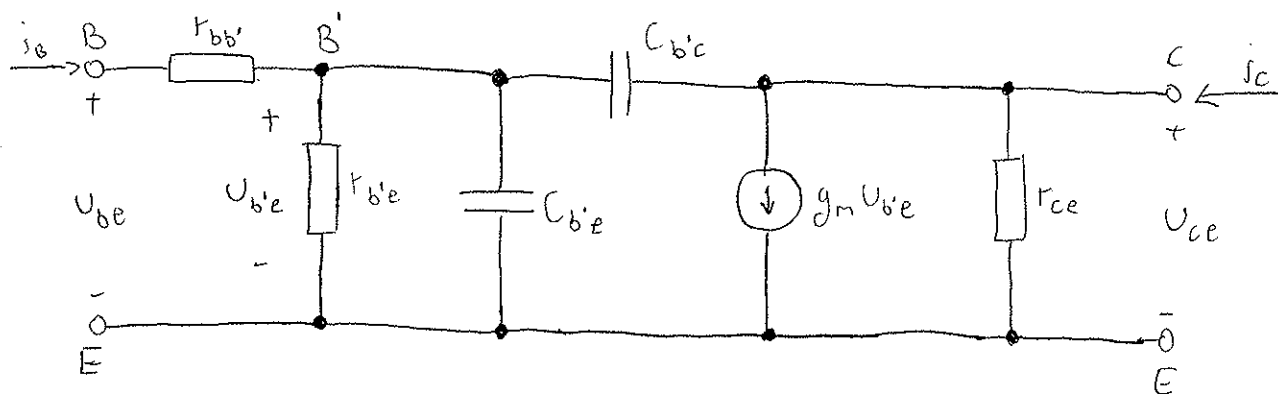
- strmina

$$g_m = \left. \frac{di_c}{dU_{B'E}} \right|_{U_{CE} = \text{konst.}} = \frac{di_c}{di_B} \frac{di_B}{dU_{B'E}} = \frac{h_{fe}}{r_{b'e}}$$

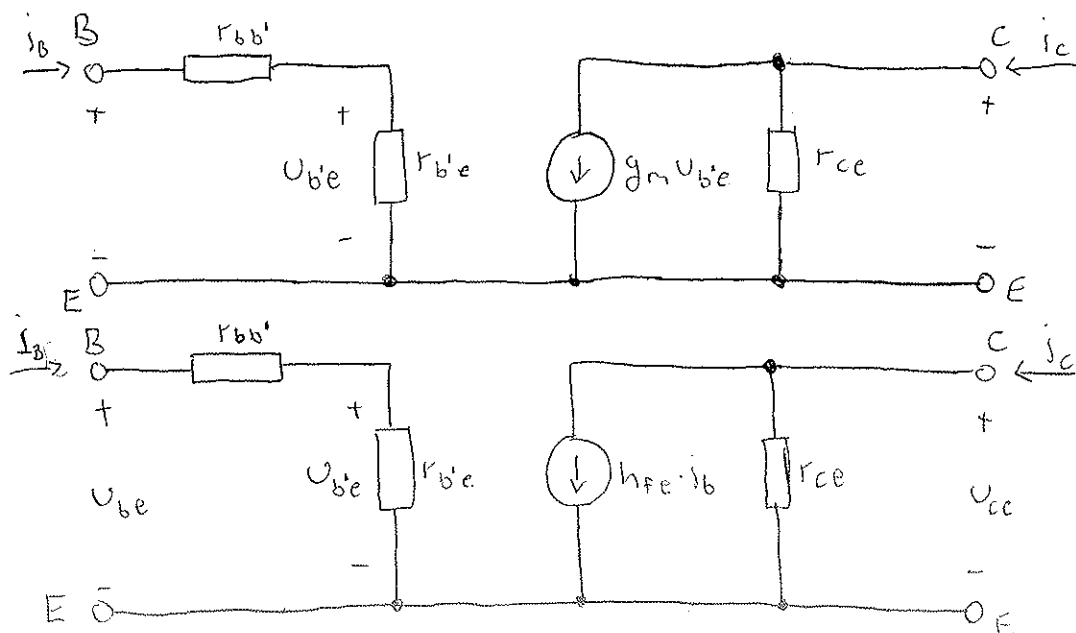
$$g_m \approx \frac{\beta}{\frac{U_T}{I_B}} = \frac{I_C}{U_T}$$

• HIBRIDNI T-MODEL BIPOLARNOG TRANZISTORA

- model za visoke frekvencije



- modeli za niske frekvencije sa strminom g_m i faktorom h_{fe}

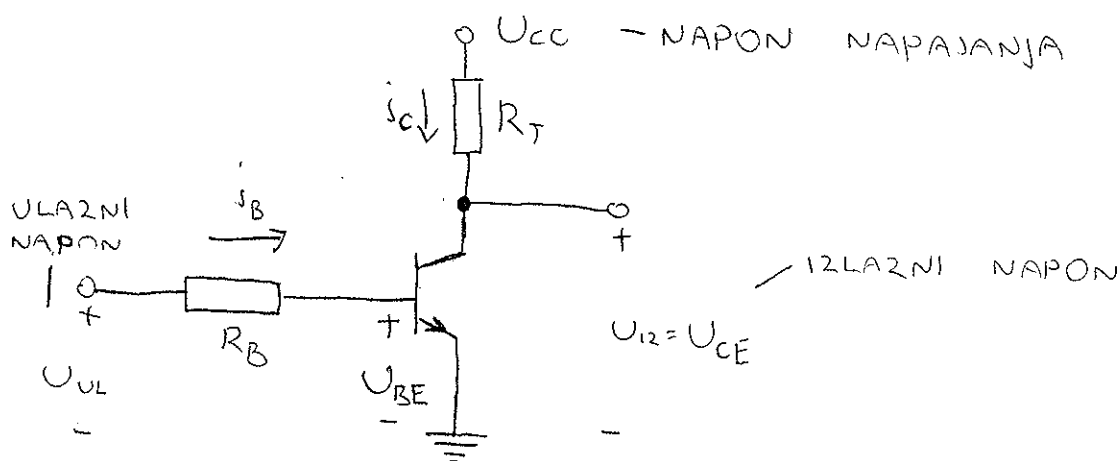


8. SKLOPOVI S BIPOLARNIM TRANZISTORIMA

- kao i MOSFET, bipolarni tranzistor spajamo kao četveropol
- opet pobudu dovodimo na ulazni priključak, a signal se s izlaznog priključka predaje trošilu
- proračun se, kao i prije, sastoji od statičke i dinamičke analize

* PRIJENOSNA KARAKTERISTIKA SKLOPA S BIPOLARNIM TRANZISTOROM

- osnovni sklop bipolarnog tranzistora u spoju zajedničkog emitera:

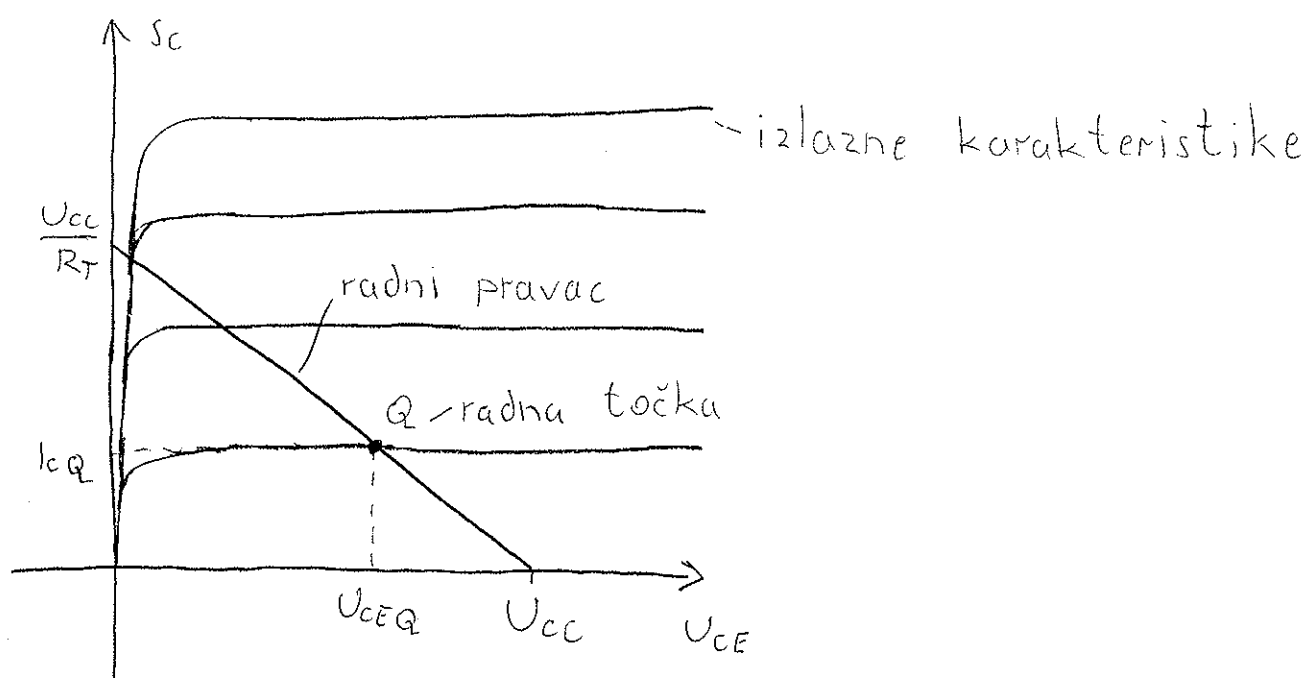


- za izlazni krug pišemo ovisnost izlaznog napona o izlaznoj struji (polje izlaznih karakteristika):

$$U_{12} = U_{CE} = U_{CC} - R_T I_C \quad \text{— radni pravac}$$

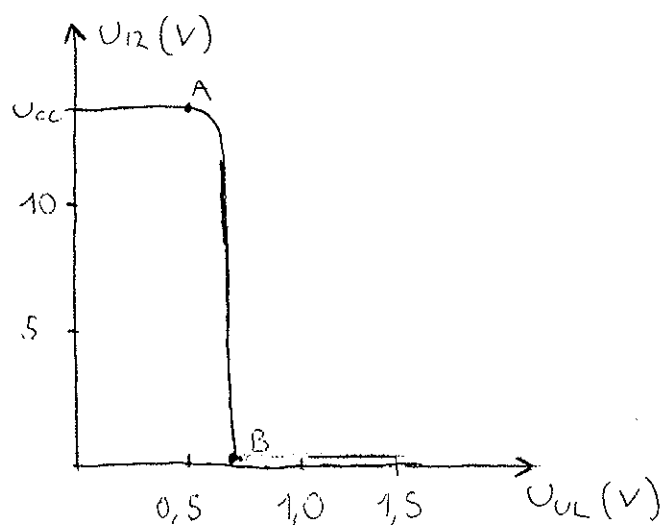
- sjecište radnog pravca i izlazne karakteristike određuje radnu točku
- A-granica normalnog aktivnog područja i područja zatiranja
- B-granica normalnog aktivnog područja i zasićenja

- izlazne karakteristike + radni pravac



- ako promijenimo ulazni napon, mijenja se izlazna kolektorska struja, a time i izlazni napon

- ovisnost izlaznog napona o ulaznom naponu, prikazana je naponskom prijenosnom karakteristikom



- dok je U_{UL} ispod 0,7V (napon koljena) tranzistor ne vodi ($i_c = 0$) i čitav napon napajanja je na izlazu

- kada napon U_{UL} dođe do 0,7V, tranzistor provede (i_c znatno poraste) i napon U_Z padne skoro na nulu

- uz zanemarenje struje zasićenja I_{CEO} , struja i_c u normalnom aktivnom području je:

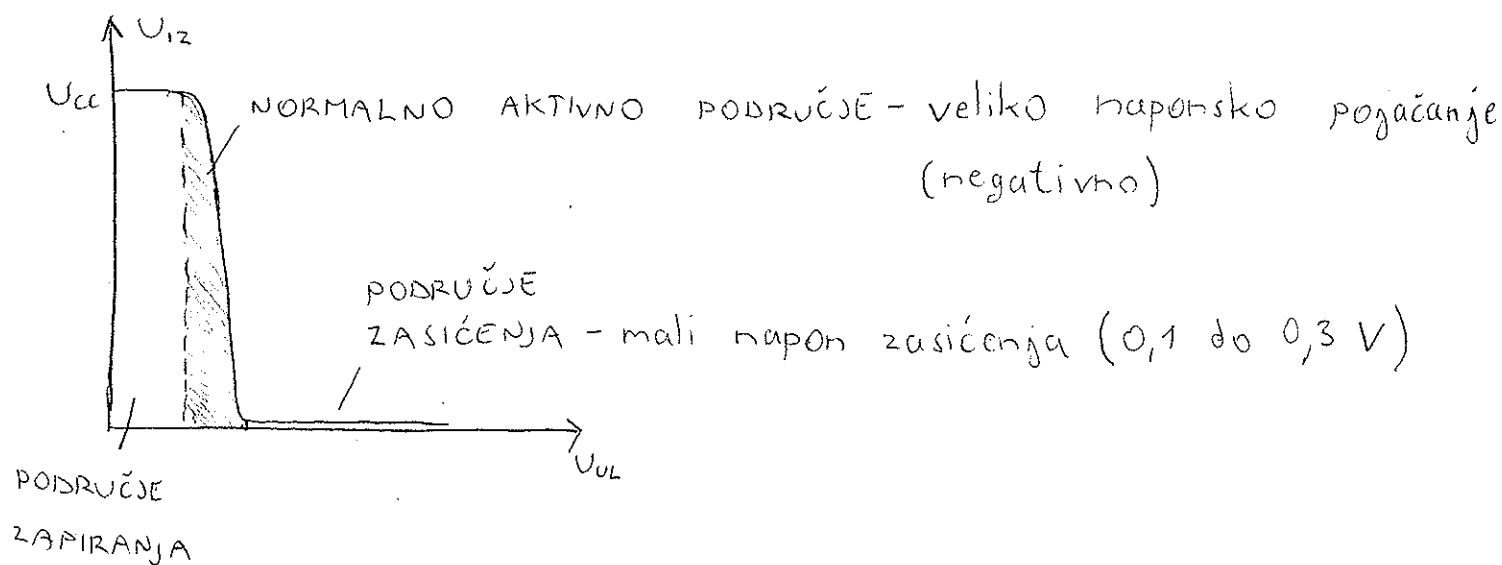
$$i_c \approx i_{nC} = \beta^* i_{nE} = I_S \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) \approx I_S \cdot \exp\left(\frac{U_{UL}}{U_T}\right)$$

$$I_c \approx I_s \cdot \exp\left(\frac{U_{UL}}{U_T}\right)$$

\
zanemarili smo struju zasićenja I_{CE0} i
pad napona na R_B ($U_{BE} \approx U_{UL}$)

- onda, možemo zapisati ovisnost $U_{I2} = f(U_{UL})$:

$$U_{I2} = U_{CC} - I_s \cdot \exp\left(\frac{U_{UL}}{U_T}\right)$$



- normalno aktivno područje koristimo u analognoj, a područja zapiiranja i zasićenja u digitalnoj elektronici

• POJAČANJA

- koristimo normalno aktivno područje, tj. dio karakteristike koji je približno linearan

- naponsko pojačanje

$$A_v = \left. \frac{dU_{I2}}{dU_{UL}} \right|_Q = - \frac{R_T}{U_T} \cdot I_s \cdot \exp\left(\frac{U_{UL}}{U_T}\right) = - \frac{I_c R_T}{U_T} = - g_m \cdot R_T$$

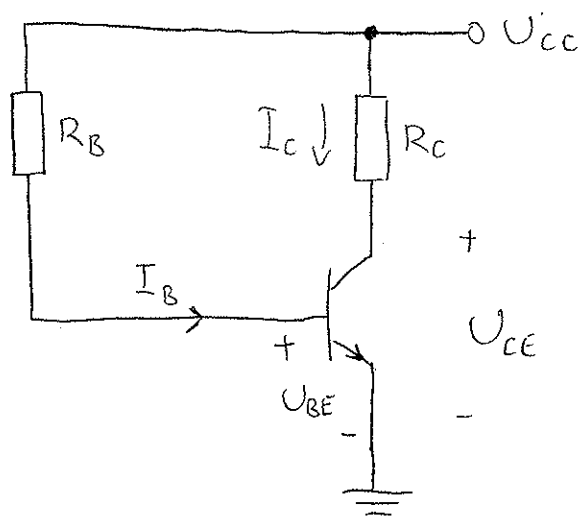
- strujno pojačanje

$$A_I = \left. \frac{dI_{I2}}{dI_{UL}} \right|_Q = - \frac{dI_c}{dI_B} = - h_{FE}$$

* PODEŠAVANJE STATIČKE RADNE TOČKE POJACALA

BIPOLARNIM TRANZISTOROM

- statičku radnu točku podešavamo, slično kao kod MOSFET-a
- bitno je osigurati istosmjernu napone i struje, koristeći napon napajanja i otpornike
- osnovni sklop za podešavanje statičke radne točke:



- ulazna bazna struja:

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{R_B}$$

- spoj baza-emiter je propusno polariziran pn-spoj, pa je napon na njemu. napon koljena:

$$U_{BEQ} = U_T = 0,7 \text{ V}$$

- onda je kolektorska struja:

$$I_{CQ} \approx \beta \cdot I_{BQ} \quad \text{- zanemareni su } I_{CEO} \text{ i porast struje } I_C \text{ s naponom } U_{CE}$$

- sad možemo dobiti i U_{CEQ} :

$$U_{CEQ} = U_{CC} - R_C \cdot I_{CQ}$$

- ovo sve vrijedi za normalno aktivno područje (mora biti zadovoljeno $U_{CEQ} > U_{BEQ}$)

- Ovim sklopom smo osigurali stalnu baznu struju, kolektorska struja ovisi o baznoj i parametru β ($I_C = \beta I_B$). Problem je što β ovisi o temperaturi. I_C zagrije tranzistor \Rightarrow poraste $\beta \Rightarrow$ poraste I_C i to se ponavlja. Zato moramo nekako stabilizirati radnu točku

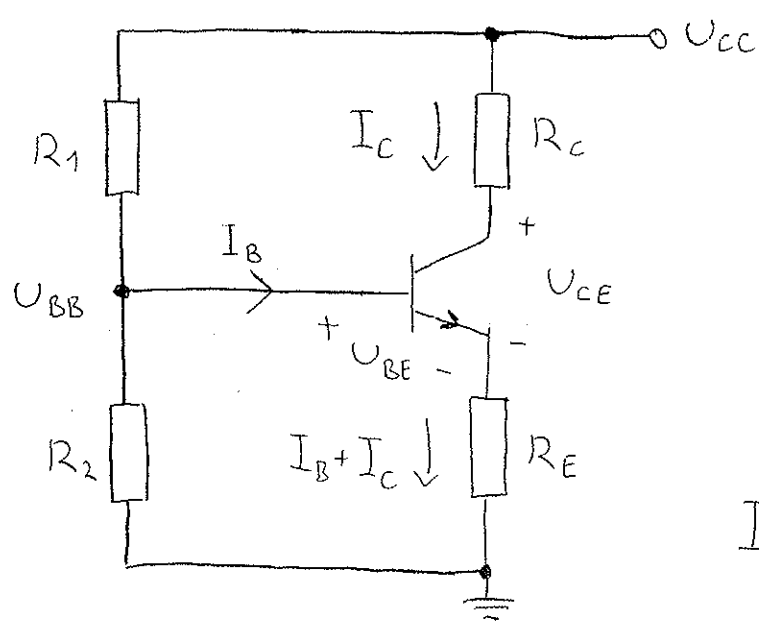
* STABILIZACIJA STATIČKE RADNE TOČKE EMITERSKIM OTPORNIKOM

- problem prethodnog sklopa:

- temperaturni koeficijent parametra β je pozitivan, tj. s porastom temperature, raste i β , a time raste i kolektorska struja koja je uzrok povećanja temperature
- da bi spriječili porast kolektorske struje (kolektorska i emitorska struja su praktički ista struja), dodajemo emitorski otpornik R_E
- Kako to funkcionira?

Kolektorska struja poraste (također je veća i emitorska) \rightarrow poraste pad napona na $R_E \rightarrow$ napon između baze i emitera se smanji \rightarrow smanji se kolektorska struja

• SKLOP ZA PODEŠAVANJE STATIČKE RADNE TOČKE EMITERSKIM OTPORNIKOM R_E



$$U_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{CC}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

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

$$U_{BEQ} = U_{BE}, I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ}$$

$$I_{BQ} = \frac{U_{BB} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta) R_E} = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

$\beta \gg 1 \Rightarrow I_{BQ}$ je zanemariva:

$$U_{CEQ} = U_{CC} - R_C \cdot I_{CQ} - R_E (I_{BQ} + I_{CQ}) \approx U_{CC} - (R_C + R_E) I_{CQ}$$

• uvjet za malu osjetljivost struje I_{CQ} na promjenu parametra β

- koristimo prethodne izraze da bi mogli izraziti kolektorsku struju

$$\left. \begin{aligned} I_{BQ} &= \frac{U_{BB} - U_{BEQ}}{R_B + (1 + \beta) R_E} \\ I_{CQ} &= \beta \cdot I_{BQ} \end{aligned} \right\} I_{CQ} = \frac{\beta (U_{BB} - U_{BEQ})}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

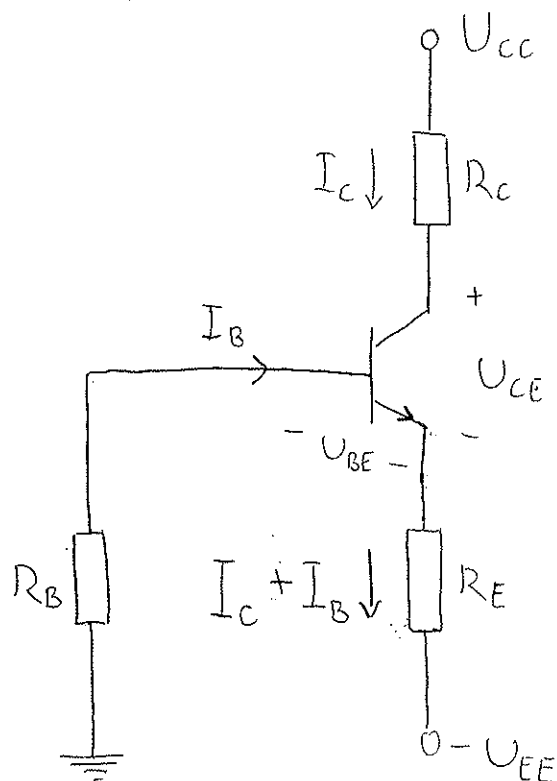
ako je $R_B \ll (1 + \beta) R_E$, onda vrijedi:

$$I_{CQ} \approx \frac{U_{BB} - U_{BEQ}}{R_E} \quad - \text{ ne ovisi o } \beta$$

- otpor R_E zove se emitorska degeneracija

* STABILIZACIJA STATIČKE RADNE TOČKE S DVA NAPONA NAPAJANJA

- sklop:



$$U_{EE} = R_B \cdot I_B + U_{BE} + R_E (I_B + I_C)$$

$$I_B = \frac{U_{EE} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

$$U_{CE} = U_{CC} + U_{EE} - (R_C + R_E) \cdot I_C$$

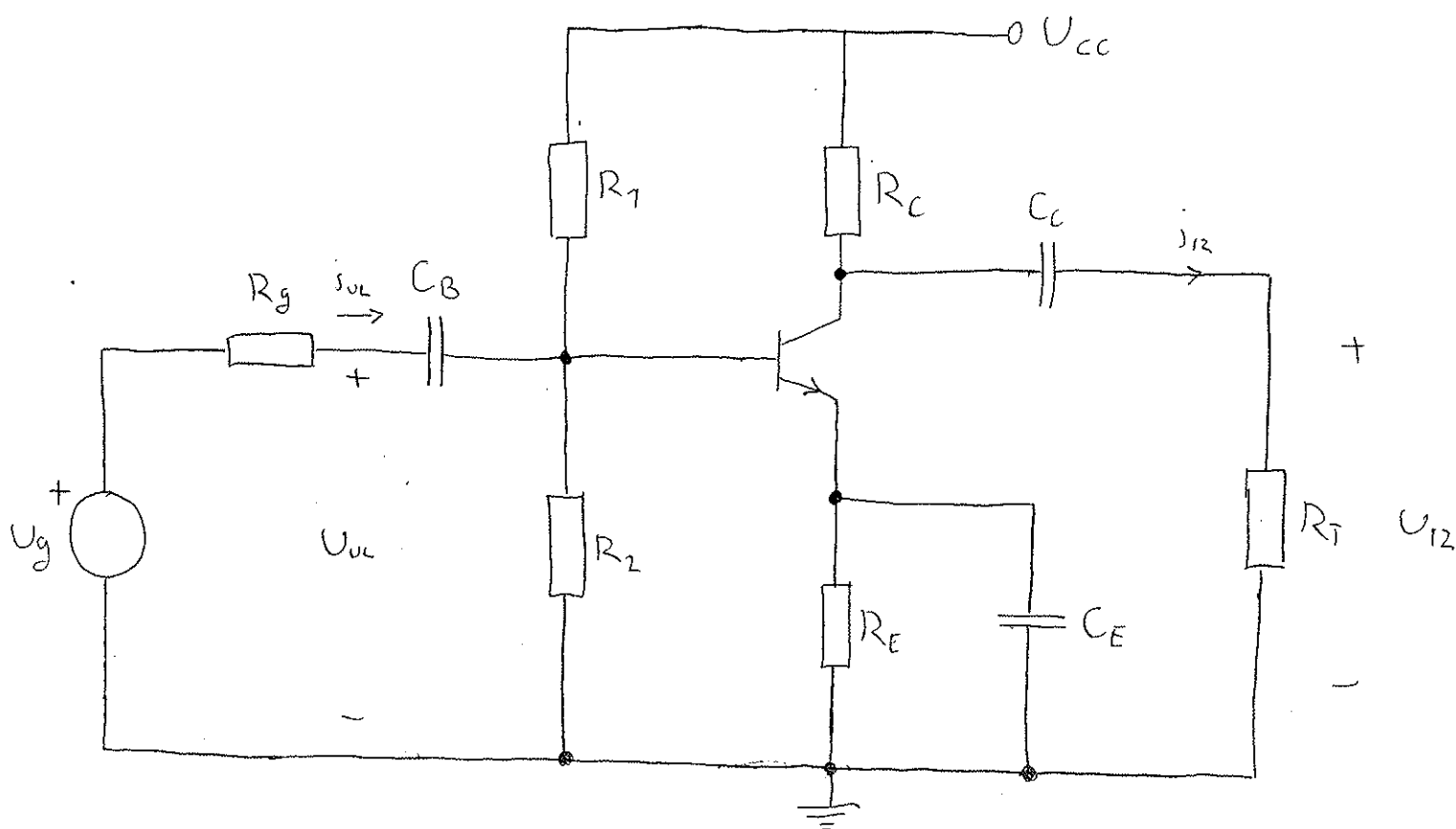
↑
 $\beta \gg 1 \Rightarrow (I_B + I_C) \approx I_C$

* OSNOVNI SPOJEVI POJAČALA S BIPOLARNIM TRANZISTOROM

- radimo u režimu malog signala
- statička analiza - određivanje struja i napona u statičkoj radnoj točki
(već smo obradili sklopove za statiku)
- dinamička analiza - određujemo dinamička svojstva pojačala
(opet imamo model za dinamičku analizu, a vrijedi kao i kod MOSFETA-a: kondenzatore kratko spojimo, tranzistor nadomještamo hibridnim π modelom, a istosmjerni napon napajanja je uzemljen)

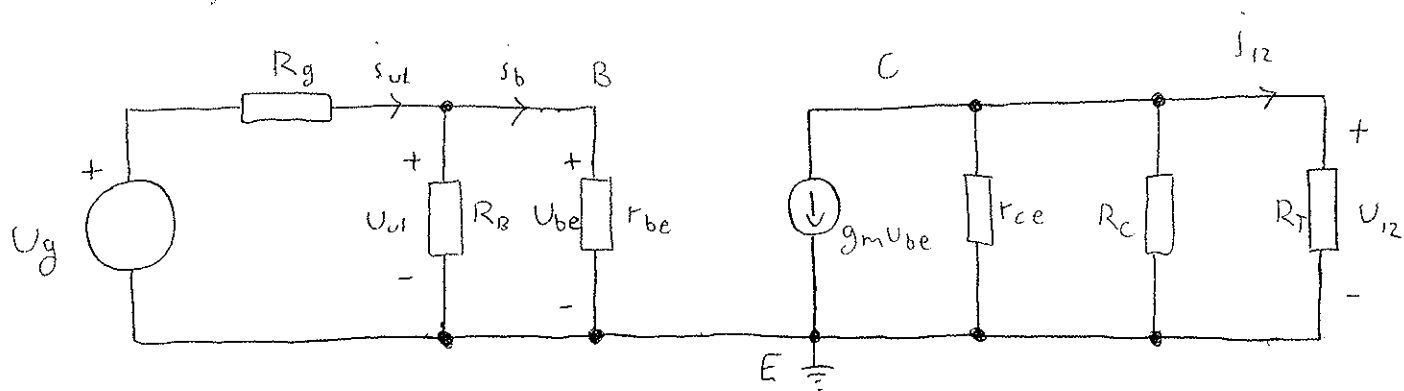
• POJAČALO U SPOJU ZAJEDNIČKOG EMITERA

- sklop:



- zanemarivat ćemo serijski otpor baze ($r_{be} \approx r_{b'e}$)

- model pojačala za dinamičku analizu:



- naponsko pojačanje:

$$A_V = \frac{U_{12}}{U_{01}} = \frac{-g_m \cdot U_{be} (r_{ce} \parallel R_C \parallel R_T)}{U_{be}} = -g_m \cdot (r_{ce} \parallel R_C \parallel R_T) \approx -g_m \cdot (R_C \parallel R_T)$$

$$A_V = -\frac{h_{FE}}{r_{be}} \cdot (r_{ce} \parallel R_C \parallel R_T) \quad - \frac{h_{FE}}{r_{be}} \text{ umjesto } g_m$$

- strujno pojačanje:

$$A_I = \frac{i_{12}}{i_{01}}, \quad i_{01} = U_{be} \cdot \frac{R_B + r_{be}}{R_B}, \quad i_{12} = -g_m \cdot U_{be} \frac{r_{ce} \parallel R_C}{(r_{ce} \parallel R_C) + R_T} \Rightarrow$$

$$A_I = -g_m \cdot \frac{r_{ce} \parallel R_C}{r_{ce} \parallel R_C + R_T} \cdot \frac{R_B}{R_B + r_{be}} \approx -g_m \frac{R_C}{R_C + R_T} \frac{R_B}{r_{be} + R_B}$$

- strujno pojačanje možemo izvesti i uz pomoć naponskog:

$$A_I = \frac{i_{12}}{i_{01}} = \frac{\frac{U_{12}}{R_T}}{\frac{U_{01}}{R_{01}}} = A_V \cdot \frac{R_{01}}{R_T}$$

- ulazni otpor:

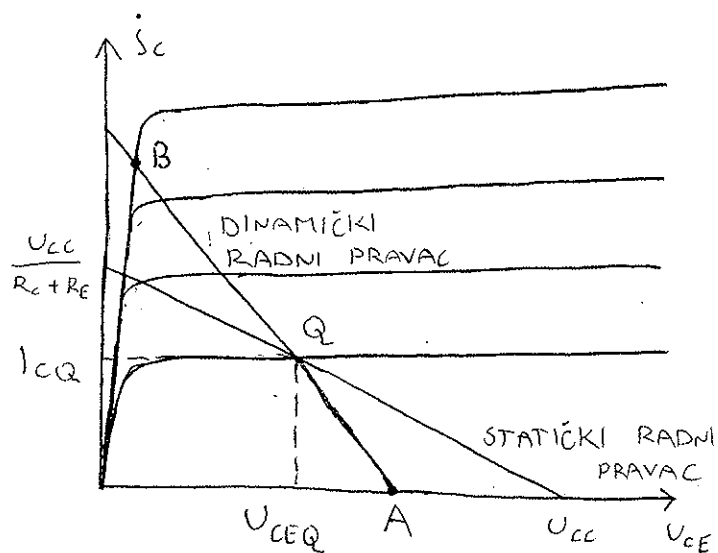
$$R_{01} = R_B \parallel r_{be}$$

- izlazni otpor:

$$R_{12} = r_{ce} \parallel R_C \approx R_C$$

• PODESAVANJE STATIČKE RADNE TOČKE ZA MAKSIMALNI HOD SIGNALA

- statička radna točka je određena sjecištem statičkog radnog pravca i izlazne karakteristike (određeno istosmjernom komponentom signala)
- signal ima i izmjeničnu komponentu - tada se radna točka pomiče po dinamičkom radnom pravcu
- tranzistor mora raditi u normalnom aktivnom području, tj. radna točka se smije pomicati između točaka A (granica sa zapiranjem) i B (granica sa zasićenjem)



STATIČKI RADNI PRAVAC

$$U_{CEQ} = U_{CC} - (R_c + R_E) \cdot I_{CQ}$$

DINAMIČKI RADNI PRAVAC

- ne možemo direktno koristiti U_{ce} , nego moramo preko totalnih veličina:

$$\left. \begin{aligned} U_{ce} &= -(R_c \parallel R_T) \cdot i_c \\ U_{ce} &= U_{CE} - U_{CEQ} \\ i_c &= i_c - I_{CQ} \end{aligned} \right\} U_{CE} - U_{CEQ} = -(R_c \parallel R_T) (i_c - I_{CQ})$$

DINAMIČKI RADNI PRAVAC

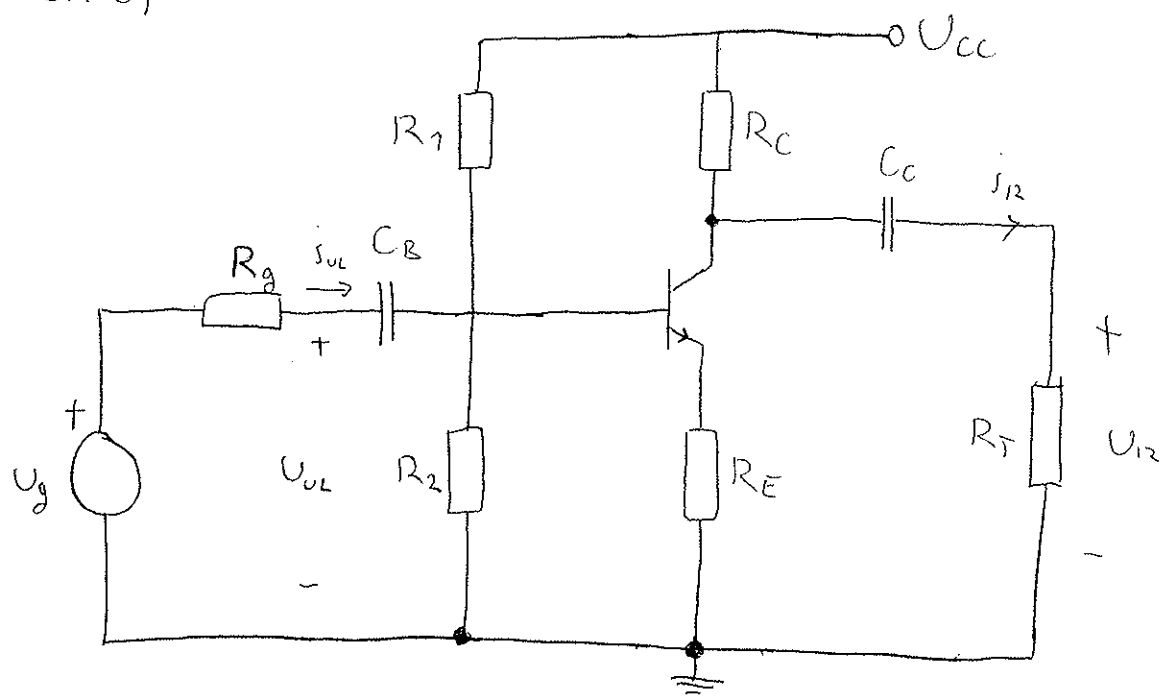
- maksimalan hod ćemo dobiti ako je Q na sredini dinamičkog radnog pravca:

$$I_{CQ} = \frac{U_{CC}}{R_c + R_E + R_c \parallel R_T}$$

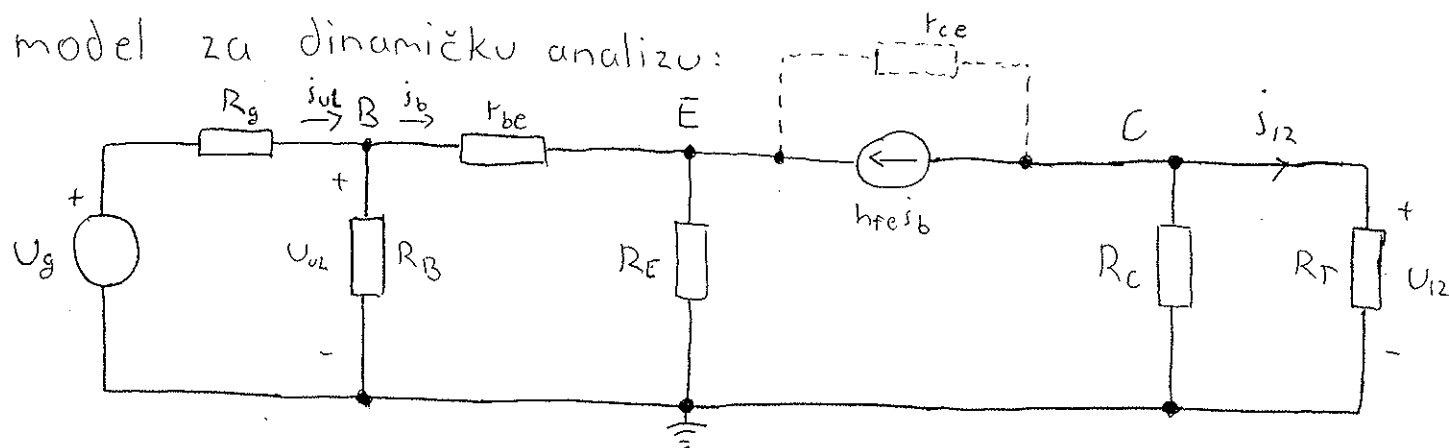
$$U_{CEQ} = \frac{R_c \parallel R_T}{R_c + R_E + R_c \parallel R_T} U_{CC}$$

• POJAČALO U SPOJU ZASLEDNIČKOG EMITERA S EMITERSKOM DEGENERACIJOM

- sklop:



- model za dinamičku analizu:



- naponsko pojačanje

$$A_v = \frac{U_{12}}{U_{Ul}} = -h_{fe} \frac{R_C \parallel R_T}{r_{be} + (1+h_{fe})R_E}$$

- ulazni otpor

$$R_{ul} = R_B \parallel [r_{be} + (1+h_{fe})R_E]$$

- strujno pojačanje

$$A_I = \frac{i_{12}}{i_{Ul}} = -h_{fe} \frac{R_C}{R_C + R_T} \frac{R_B}{R_B + r_{be} + (1+h_{fe})R_E}$$

- izlazni otpor

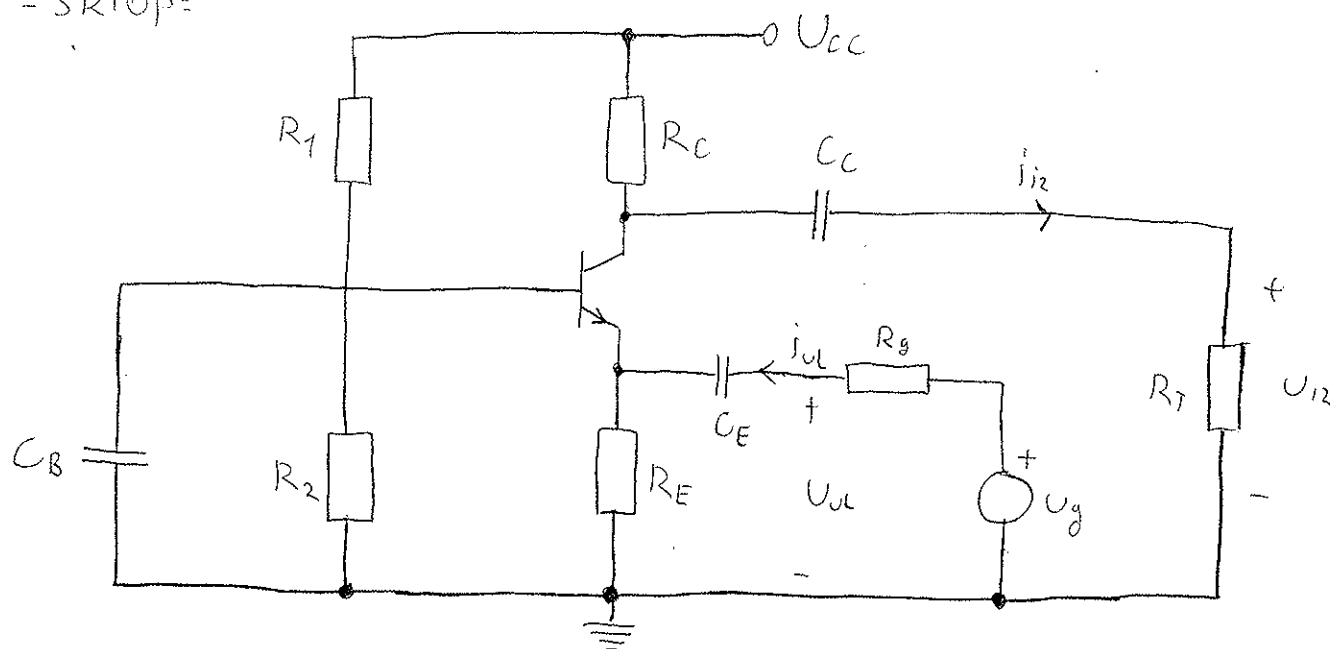
$$R_{12} = R_C$$

$$A_v = -h_{fe} \frac{R_C \parallel R_T}{r_{be} + (1+h_{fe})R_E}, \quad h_{fe} \gg 1 \Rightarrow A_v = \frac{-g_m (R_C \parallel R_T)}{1 + g_m R_E}, \quad g_m R_E \gg 1 \Rightarrow$$

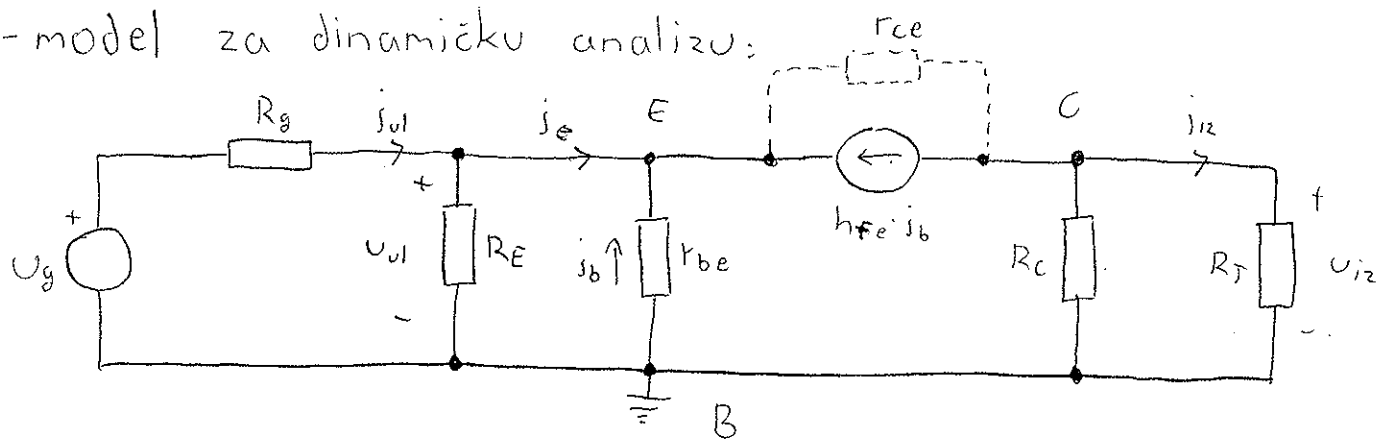
$A_v \approx -\frac{R_C \parallel R_T}{R_E}$ - A_v ne ovisi o parametrima tranzistora, pa ovaj spoj ima stabilnije pojačanje

• POJAČALO U SPOJU ZAJEDNIČKE BAZE

- sklop:



- model za dinamičku analizu:



- naponsko pojačanje

$$A_V = \frac{U_{I2}}{U_{I1}} = h_{fe} \cdot \frac{R_C \parallel R_T}{r_{be}} = g_m (R_C \parallel R_T)$$

- strujno pojačanje

$$A_I = \frac{i_{I2}}{i_{I1}} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \cdot \frac{R_C}{R_C + R_T} \cdot \frac{R_E}{R_E + \frac{r_{be}}{1 + h_{fe}}}$$

- ulazni otpor

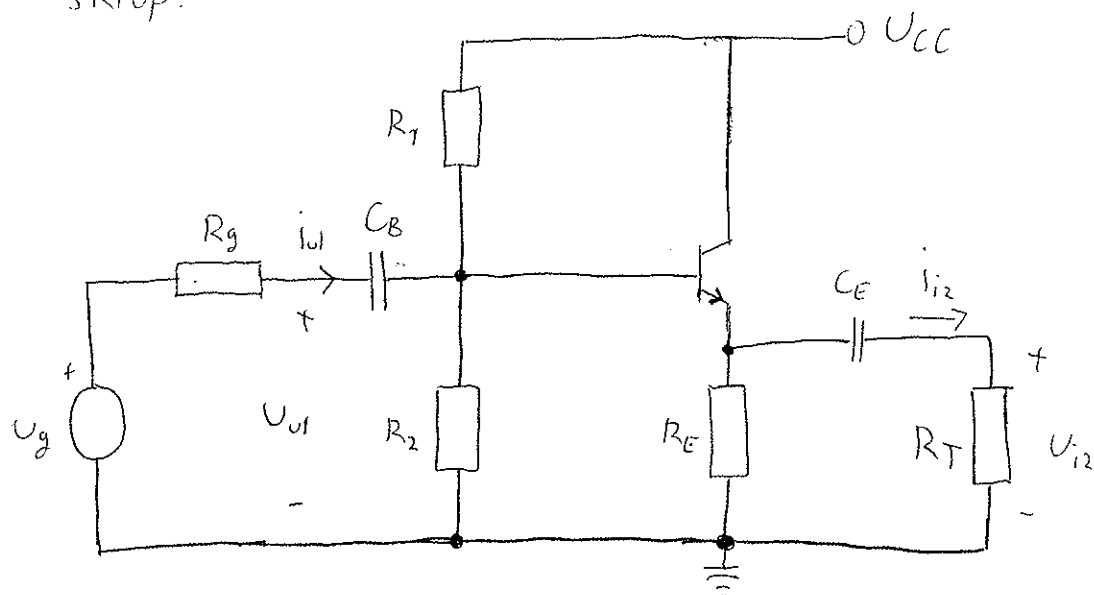
$$R_{ul} = R_E \parallel \frac{r_{be}}{1 + h_{fe}} \approx R_E \parallel \frac{1}{g_m}$$

- izlazni otpor

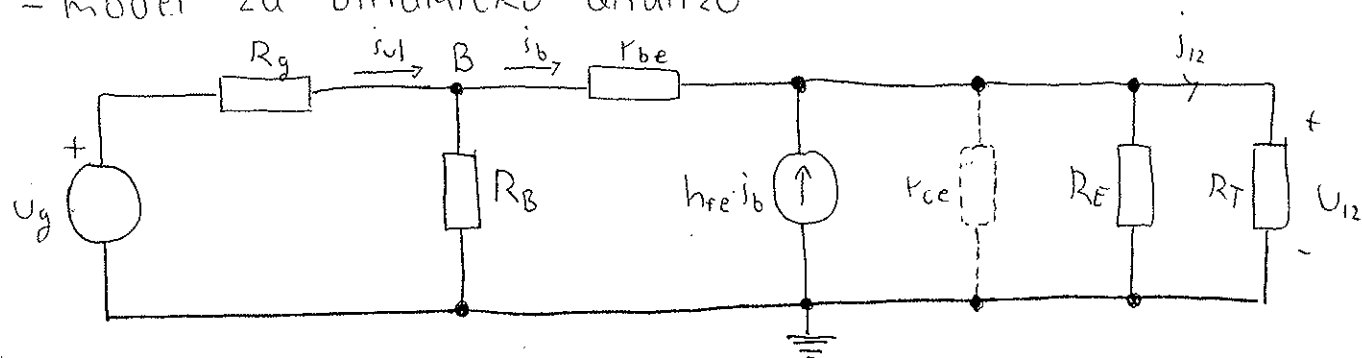
$$R_{I2} = R_C$$

* POJAČALO U SPOJU ZAJEDNIČKOG KOLEKTORA - EMITERSKO SLJEDILO

- sklop:



- model za dinamičku analizu



- naponsko pojačanje

$$A_V = \frac{U_{i2}}{U_{i1}} = \frac{(1+h_{fe})(R_E \parallel R_T)}{r_{be} + (1+h_{fe})(R_E \parallel R_T)}$$

$$h_{fe} \gg 1 \Rightarrow$$

$$A_V \approx \frac{g_m(R_E \parallel R_T)}{1 + g_m(R_E \parallel R_T)}$$

$$g_m(R_E \parallel R_T) \gg 1 \Rightarrow A_V \approx 1$$

- zato se zove emittersko sljedilo

- strujno pojačanje:

$$A_I = \frac{i_{i2}}{i_{i1}} = (1+h_{fe}) \frac{R_E}{R_E + R_T} \frac{R_B}{R_B + r_{be} + (1+h_{fe})(R_E \parallel R_T)}$$

- ulazni otpor

$$R_{i1} = R_B \parallel [r_{be} + (1+h_{fe})(R_E \parallel R_T)]$$

- izlazni otpor

$$R_{i2} = R_E \parallel \frac{R_g \parallel R_B + r_{be}}{1+h_{fe}}$$

* USPOREDBA OSNOVNIH SPOJEVA POJAČALA S BIPOLARNIM TRANZISTORIMA

	ZAJEDNIČKI EMITER	ZAJEDNIČKA BAZA	ZAJEDNIČKI KOLEKTOR
A_v	$-g_m(R_C \parallel R_T)$	$g_m(R_C \parallel R_T)$	$\frac{g_m(R_E \parallel R_T)}{1 + g_m(R_E \parallel R_T)}$
A_i	$-h_{fe} \frac{R_C}{R_C + R_T} \frac{R_B}{R_B + r_{be}}$	$\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \frac{R_C}{R_C + R_T} \frac{R_E}{R_E + \frac{r_{be}}{1 + h_{fe}}}$	$(1 + h_{fe}) \frac{R_E}{R_E + R_T} \frac{R_B}{R_B + r_{be} + (1 + h_{fe})(R_E \parallel R_T)}$
R_{ul}	$R_B \parallel r_{be}$	$R_E \parallel \frac{r_{be}}{1 + h_{fe}}$	$R_B \parallel [r_{be} + (1 + h_{fe})(R_E \parallel R_T)]$
R_{iz}	R_C	R_C	$R_E \parallel \frac{R_B \parallel R_T + r_{be}}{1 + h_{fe}}$

• ZAJEDNIČKI EMITER

- negativna pojačanja
- velika pojačanja
- ulazni otpor oko $1k\Omega$
- izlazni otpor oko $1k\Omega$

• ZAJEDNIČKA BAZA

- pozitivna pojačanja
- naponsko po iznosu jednako kao i kod zaj. emitera
- strujno manje od 1
- ulazni otpor oko 10Ω
- izlazni otpor oko $1k\Omega$

• ZAJEDNIČKI KOLEKTOR

- pozitivna pojačanja
- naponsko malo manje od 1
- strujno veliko
- ulazni otpor oko $100k\Omega$
- izlazni otpor oko 10Ω

* USPOREDBA s MOSFET-om

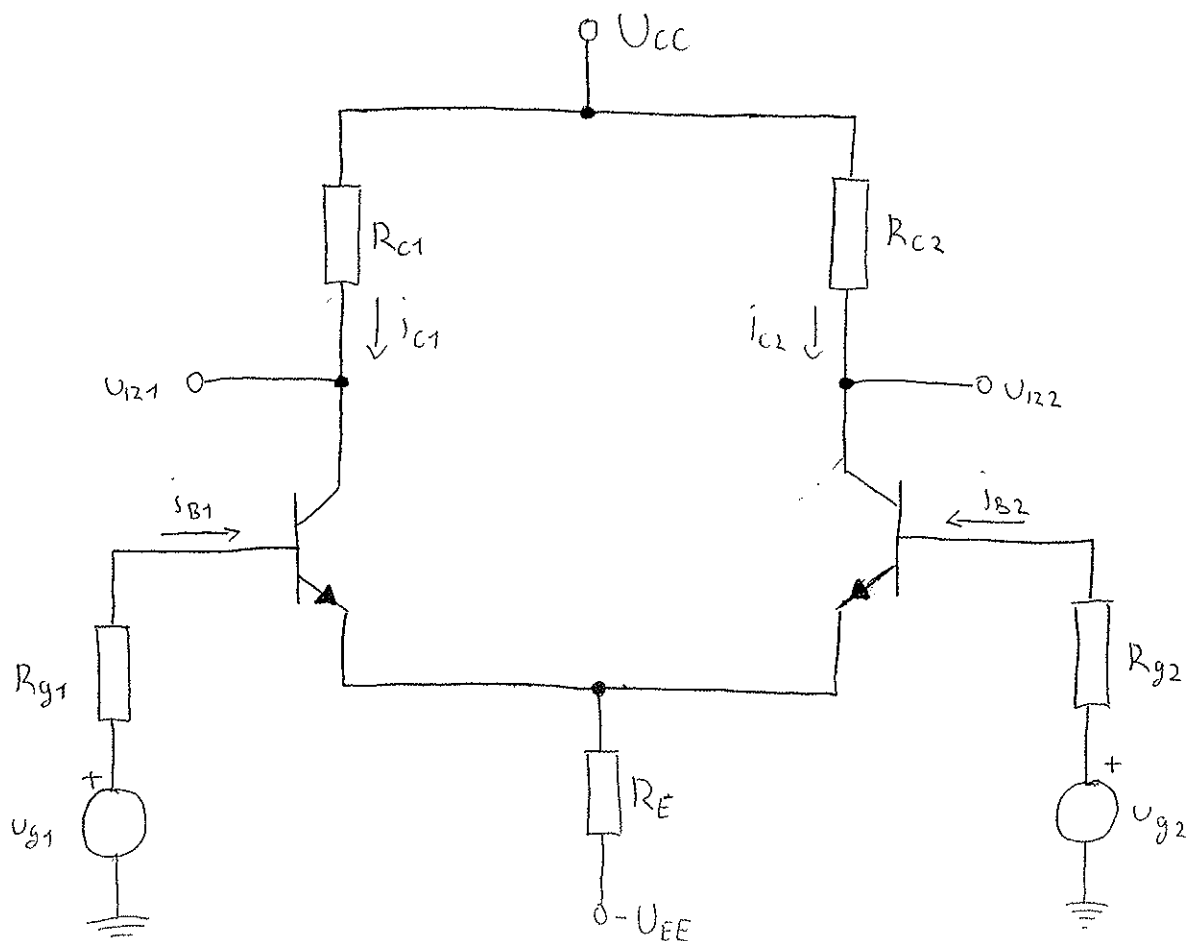
- slična svojstva spojiva:

- zajednički emiter i zajednički uvod
- zajednička baza i zajednička upravljačka elektroda
- zajednički kolektor i zajednički odvod

- MOSFET-i imaju manju strminu g_m i manje naponsko pojačanje
- MOSFET-i su sporiji sklopovi
- MOSFET-i imaju veće ulazne otpore
- MOSFET-i su temperaturno stabilniji (porastom temperature, izlazna struja odvoda pada, dok kod bipolarnog kolektorska struja raste)

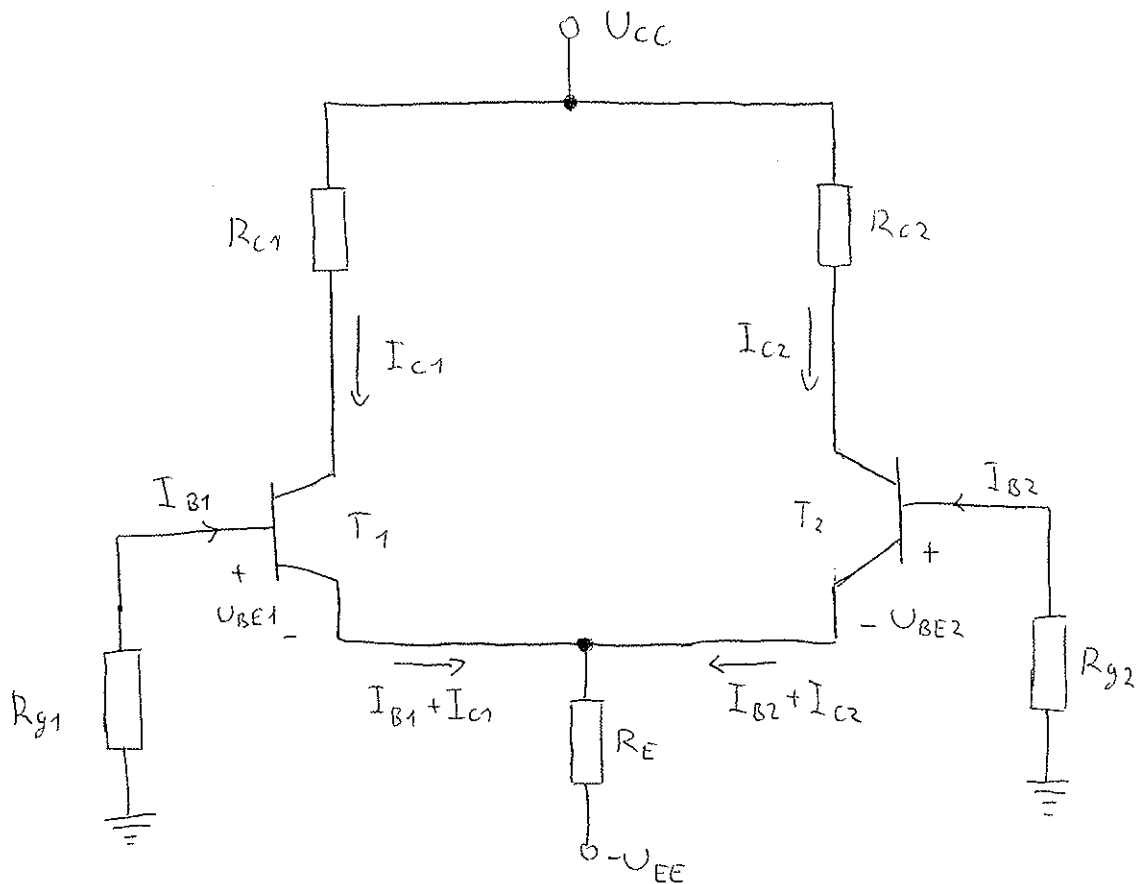
* DIFERENCIJSKO POJAČALO

- koristi se kao ulazno pojačalo
- ulazni stupanj operacijskog pojačala, razne primjene
- osnovni spoj di



• STATIČKA ANALIZA

- sklop za statičku analizu



$$U_{EE} = I_{BQ1} \cdot R_{g1} + U_{BEQ1} + 2(1+\beta) \cdot I_{BQ1} \cdot R_E$$

$$U_{EE} = I_{BQ2} \cdot R_{g2} + U_{BEQ2} + 2(1+\beta) \cdot I_{BQ2} \cdot R_E$$

- ovo vrijedi, ako su grane simetrične (T_1 i T_2 imaju iste parametre, $R_{C1} = R_{C2}$, $R_{g1} = R_{g2}$)

- normalno aktivno područje ($U_{BEQ} = U_{BE}$)

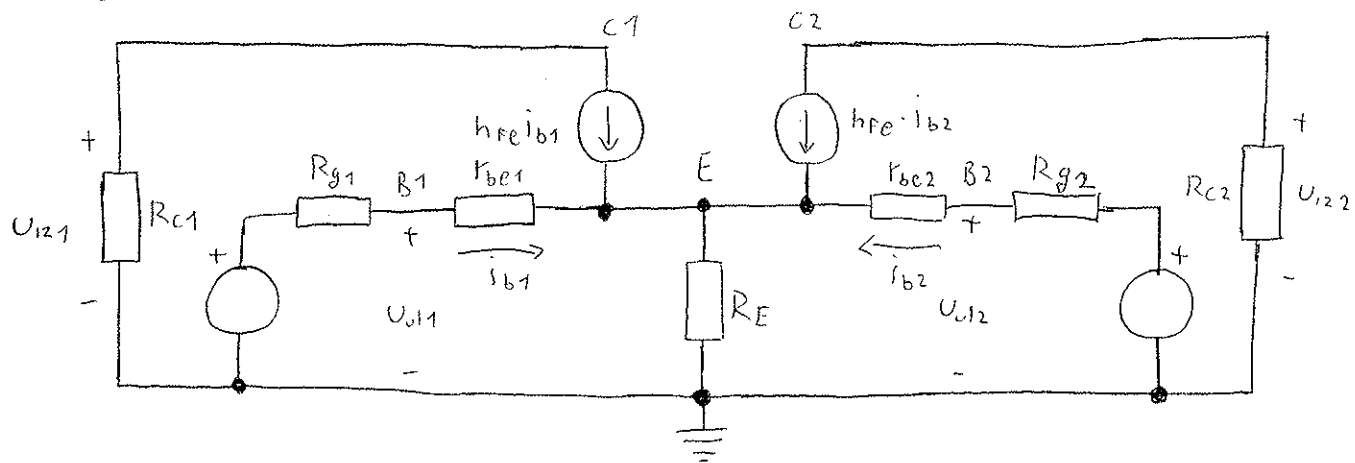
$$I_{BQ1} = I_{BQ2} = \frac{U_{EE} - U_{BEQ1}}{R_{g1} + 2(1+\beta)R_E}$$

$$I_{BQ1} = I_{BQ2} \Rightarrow I_{CQ1} = I_{CQ2} = \beta I_{BQ1} = \beta I_{BQ2}$$

$$U_{CEQ1} = U_{CEQ2} = U_{CC} + U_{EE} - [\beta \cdot R_{C1} + 2(1+\beta)R_E] I_{BQ1} \approx U_{CC} + U_{EE} - (R_{C1} + 2R_E) I_{CQ1}$$

• DINAMIČKA ANALIZA

- model za dinamičku analizu



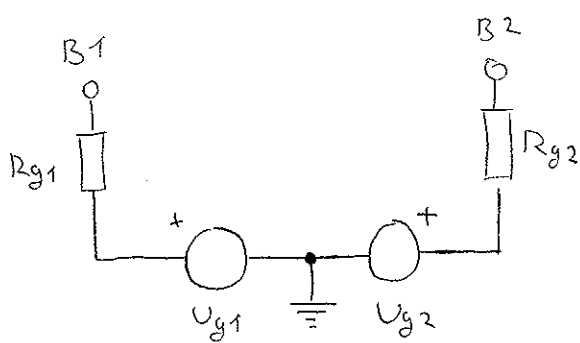
- signale U_{g1} i U_{g2} na zajednički i diferencijski signal

ZAJEDNIČKI SIGNAL

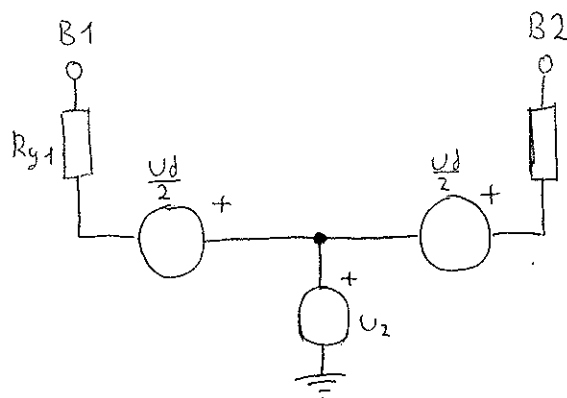
$$U_2 = \frac{U_{g1} + U_{g2}}{2}$$

DIFERENCIJSKI SIGNAL

$$U_d = U_{g2} - U_{g1}$$



\Rightarrow



- superpozicija - zasebno analiziramo zajednički i diferencijski signal

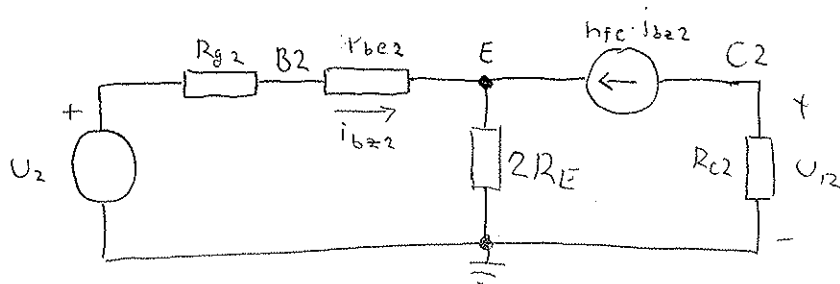
• POJAČANJE ZAJEDNIČKOG SIGNALA

- simetrične grane, pa možemo „prepoloviti“ shemu

$$U_{i2} = -h_{fe} \cdot i_{b2} \cdot R_{c2}$$

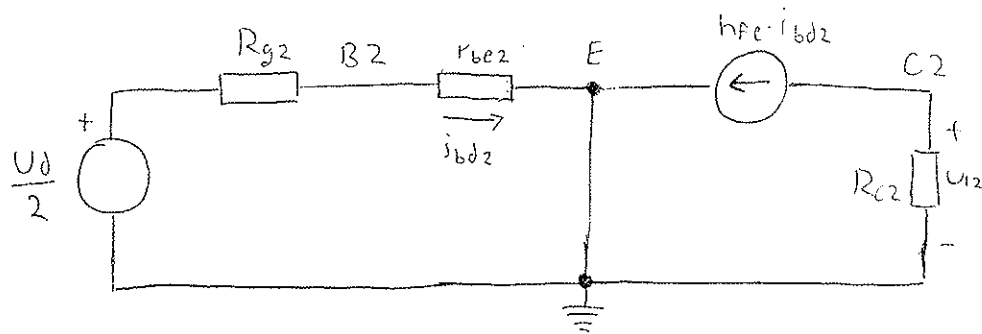
$$U_2 = i_{b2} [R_{g2} + r_{be2} + 2R_E(1+h_{fe})]$$

$$A_{vz} = \frac{-h_{fe} \cdot R_{c2}}{R_{g2} + r_{be2} + 2R_E(1+h_{fe})}$$



• POJAČANJE DIFERENCIJSKOG SIGNALA

- opet polovica sheme



$$i_{bd1} = -i_{bd2}$$

$$U_{12} = -h_{fe} \cdot i_{bd2} \cdot R_{c2}$$

$$\frac{U_d}{2} = i_{bd2} (R_{g2} + r_{be2})$$

$$A_{vd} = \frac{-h_{fe} \cdot R_{c2}}{2(R_{g2} + r_{be2})}$$

• FAKTOR POTISKIVANJA

- emitorska degeneracija smanjuje zajedničko pojačanje, dok na diferencijsko ne utječe i ono je znatno veće
- diferencijsko pojačalo bi i trebalo imati jako diferencijsko i slabo zajedničko pojačanje
- kvaliteta diferencijskog pojačala iskazana je faktorom potiskivanja ρ

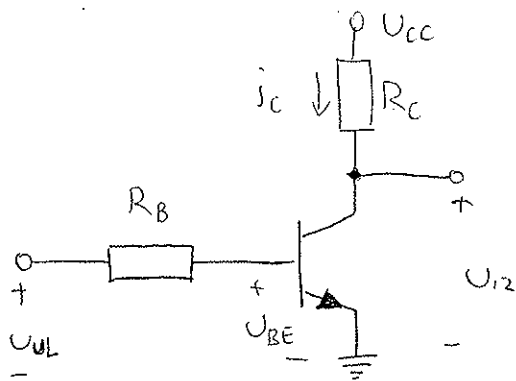
$$\rho = \frac{|A_{vd}|}{|A_{vz}|}$$

$$\rho = \frac{R_{g2} + r_{be2} + 2R_E(1+h_{fe})}{2(R_{g2} + r_{be2})} = \frac{1}{2} + \frac{R_E(1+h_{fe})}{R_{g2} + r_{be2}}$$

$$R_{g1} = R_{g2} = 0 \Rightarrow \rho = \frac{1}{2} + \frac{R_E(1+h_{fe})}{r_{be2}} \approx \frac{1}{2} + g_{m2} R_E = \frac{1}{2} + \frac{I_{CQ2}}{U_T} \cdot R_E$$

* BIPOLARNI TRANZISTOR KAO SKLOPKA

- osim u pojačalima, bipolarni tranzistor se koristi i kao električki upravljiva sklopka (uloga sklopke je uključivanje ili isključivanje struje kroz trošilo)

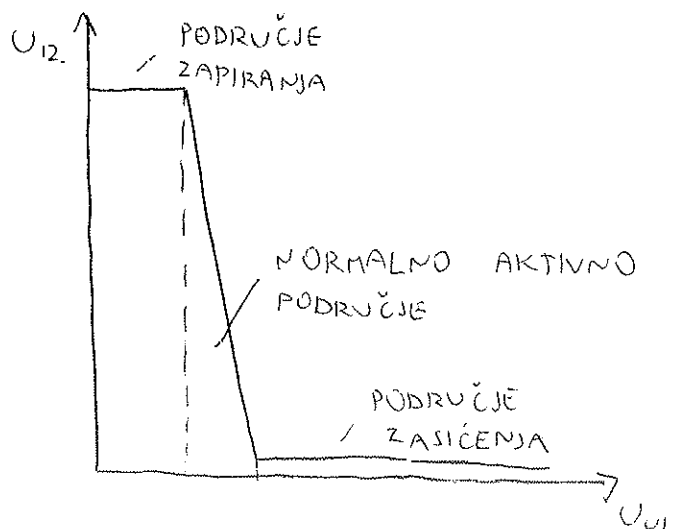


$$I_B = \frac{U_{IL} - U_{BE}}{R_B}$$

$$U_{IZ} = U_{CC} - R_C I_C$$

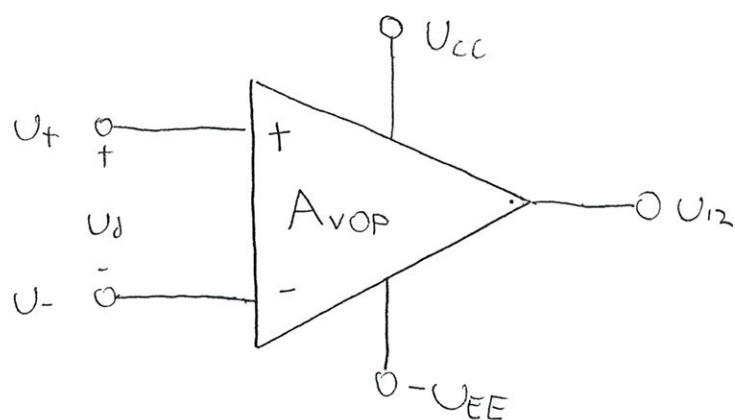
- za jako mali ulazni napon, bazna struja je praktički jednaka nuli i tranzistor je u području zapiranja - isključena sklopka
- ulazni napon raste, raste i kolektorska struja, što dovodi da pada napona U_{CE} koji pada do $U_{CE_{zas}}$ i tranzistor ulazi u područje zasićenja (ulazni napon je rastao - iz zapiranja smo ušli u normalno aktivno područje i onda u područje zasićenja)
- u zasićenju imamo mali napon $U_{BE_{zas}}$ (oko 0,7V), što je jednako izlaznom naponu - tranzistor radi kao uključena sklopka

• NAPONSKA PRIENOSNA KARAKTERISTIKA



10. SKLOPOVI S OPERACIJSKIM POJAČALIMA

- dva ulaza i jedan izlaz, priključci za napone napajanja



- u linearnom radu, izlazni napon je jednak razlici napona na ulaznim stezaljkama, uvećanoj A_{VOP} puta

$$U_{IZ} = A_{VOP} (U_+ - U_-)$$

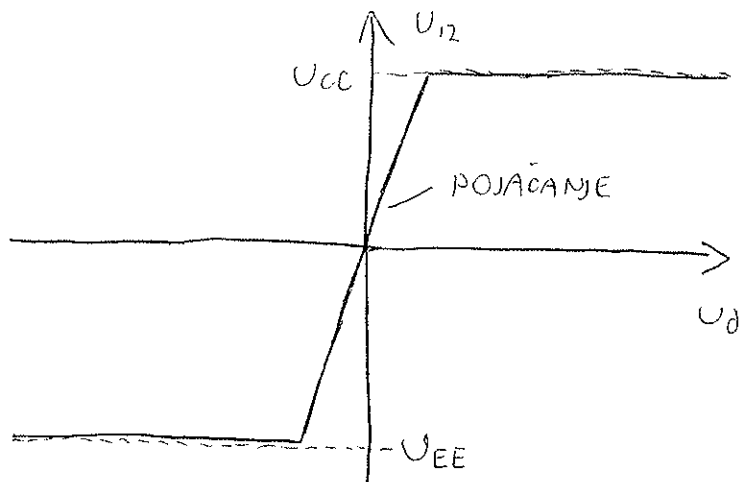
- stezaljka "+" se zove neinvertirajući ulaz, a "-" invertirajući

- u analizi koristimo idealno operacijsko pojačalo

- svojstva idealnog i realnog op. pojačala

SVOJSTVO	IDEALNO	REALNO
naponsko pojačanje	∞	$10^4 - 10^6$
ulazni otpor	∞	1 M Ω i više
izlazni otpor	0	100 Ω i manje
gornja granična frekvencija	∞	10 Hz i više

* PRIENOSNA KARAKTERISTIKA OPERACIJSKOG POJAČALA

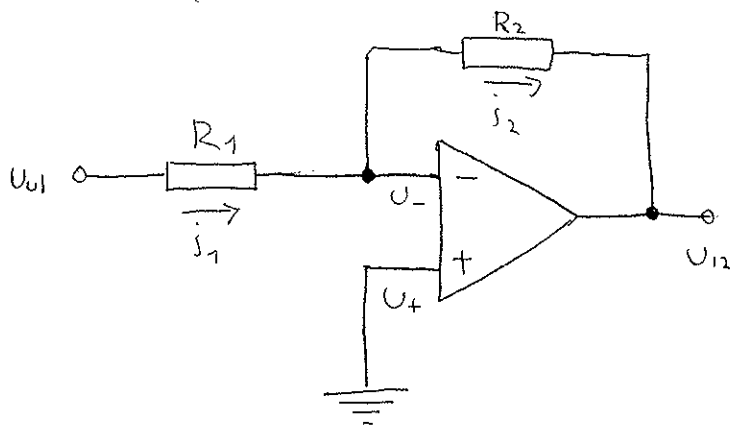


- pojačalo radi linearno do određene vrijednosti izlaznog napona
- ta vrijednost je određena naponom napajanja, tj. izlazni napon je ograničen naponom napajanja

* IZVEDBE POJAČALA

- pojačanja op. pojačala su velika, ali se rasipaju u širokim granicama
- zato se koristi negativna povratna veza - pojačanje je manje, ali stabilnije

* INVERTIRAJUĆE POJAČALO



$$i_1 = \frac{U_{01} - U_-}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{U_- - U_{12}}{R_2}$$

$$(U_+ - U_-) A_{VOP} = U_{12} \Rightarrow U_- = \frac{U_{12}}{A_{VOP}}$$

$$i_1 = i_2 \ll R_{01} \rightarrow \infty$$



$$A_V = \frac{U_{12}}{U_{01}} = - \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{VOP}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad A_{VOP} \rightarrow \infty \Rightarrow A_V = - \frac{R_2}{R_1}$$

• VIRTUALNI (PRIVIDNI) KRATKI SPOJ

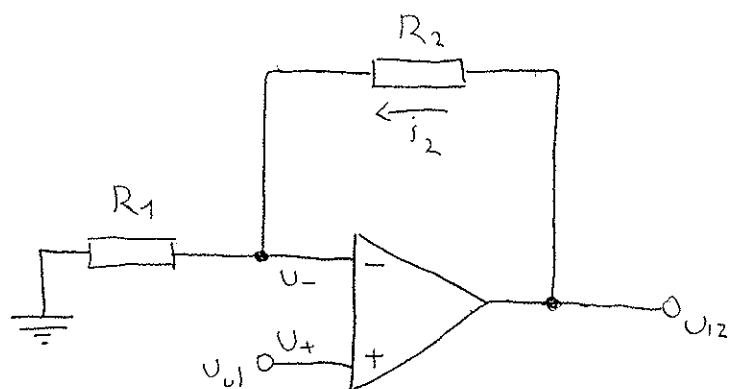
- metoda koju koristimo za analizu mreže s operacijskim pojačalom

$$\left. \begin{aligned} U_{i2} &= A_{vop} (U_+ - U_-) \\ U_+ - U_- &= \frac{U_{i2}}{A_{vop}} \\ A_{vop} &\rightarrow \infty \end{aligned} \right\} U_+ - U_- = 0$$

$$U_+ = U_-$$

- ulazne stezaljke su na istom potencijalu, ali u njih ne teče struja

• NEINVERTIRAJUĆE POJAČALO



$$\frac{U_-}{R_1} = \frac{U_{i2} - U_-}{R_2}$$

$$\frac{U_{i2}}{U_{i1}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{vop}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}$$

$$U_+ - U_- = U_{i1} - U_- = \frac{U_{i2}}{A_{vop}}$$

$$A_{vop} \rightarrow \infty$$

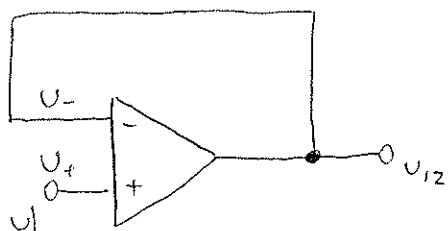
$$U_- = U_{i1} - \frac{U_{i2}}{A_{vop}}$$

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$\left(U_{i1} - \frac{U_{i2}}{A_{vop}} \right) \frac{1}{R_1} = \left(U_{i2} - U_{i1} + \frac{U_{i2}}{A_{vop}} \right) \frac{1}{R_2}$$

$$U_{i1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = U_{i2} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{U_{i2}}{A_{vop}} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right)$$

• NAPONSKO SLJEDILO

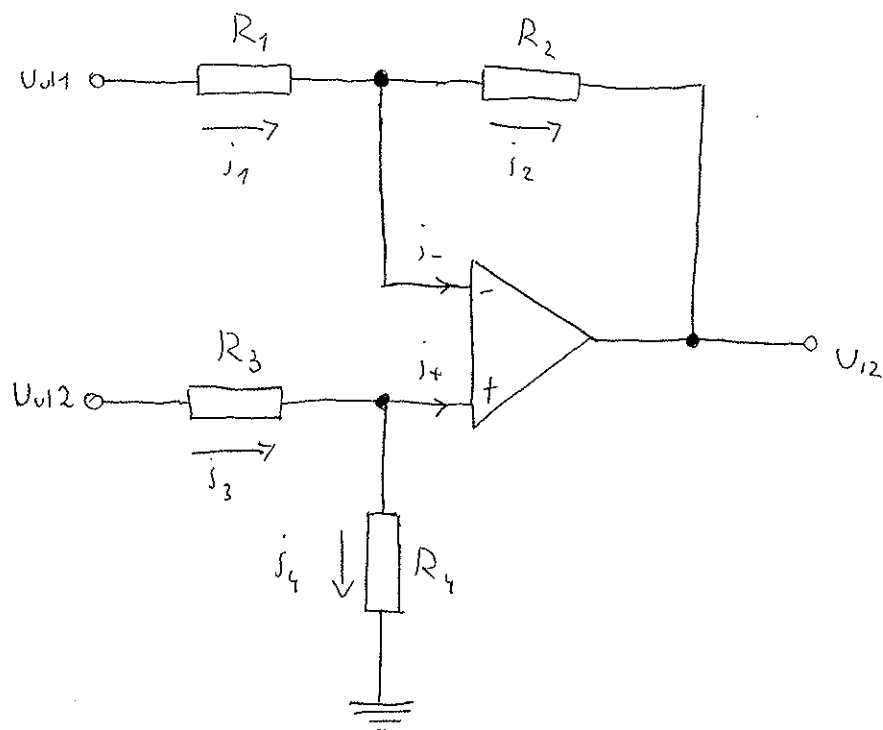


$$U_f - U_- = U_{o1} - U_- = \frac{U_{12}}{A_{vop}}$$

$$U_{o1} = U_- = U_{12}$$

$U_{o1} = U_{12}$ - naponsko sljedilo

• DIFERENCIJSKO POJAČALO



$$i_- = 0$$

$$i_+ = 0$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_{o11} - U_-}{R_1} &= \frac{U_- - U_{12}}{R_2} \Rightarrow U_{12} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_- - \frac{R_2}{R_1} U_{o11} \\ U_+ &= \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{o12} \end{aligned} \right\} \text{slijedi:}$$

$$U_{12} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{o12} - \frac{R_2}{R_1} U_{o11}$$

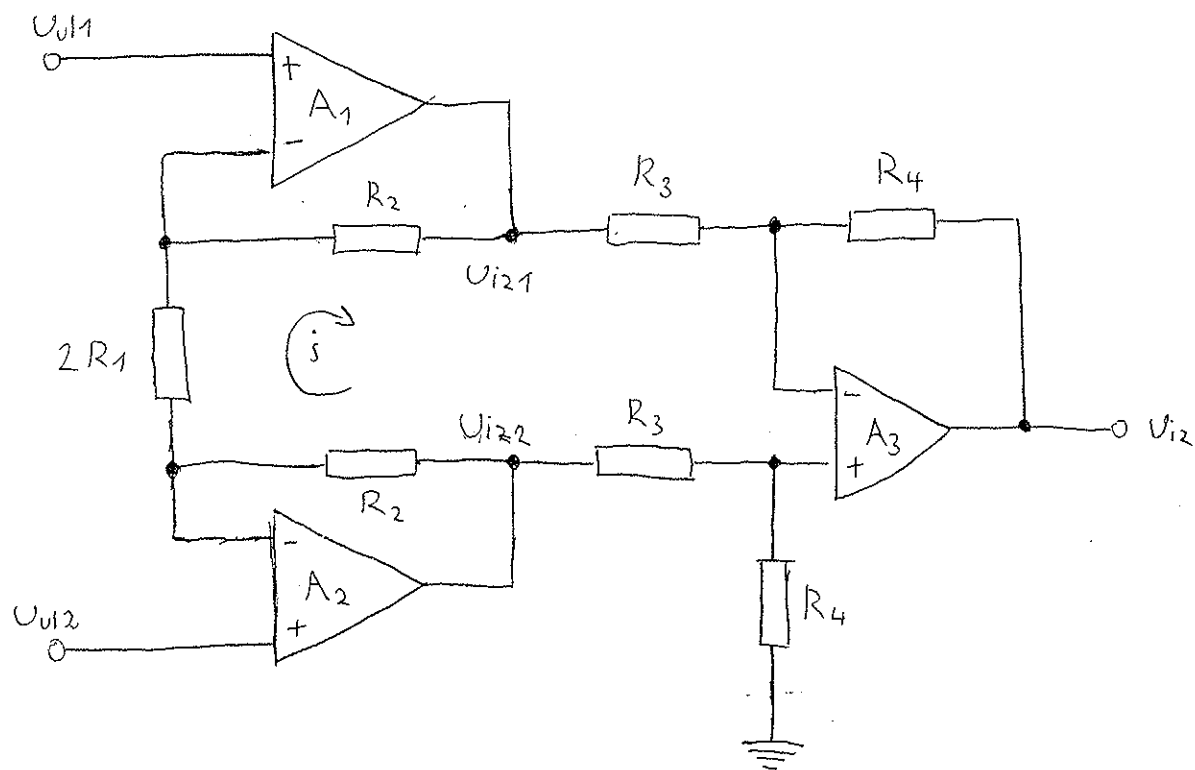
- U_2 $R_3 = R_1$ i $R_2 = R_4$, a $(U_{12} - U_{11}) = U_d$ - diferencijski signal

$$U_{12} = \frac{R_2}{R_1} (U_{o12} - U_{o11}) = \frac{R_2}{R_1} U_d$$

$$\frac{U_{12}}{U_d} = A_{vd} = \frac{R_2}{R_1} - \text{diferencijsko pojačanje}$$

• INSTRUMENTACIJSKO POJAČALO

- nedostatak diferencijskog pojačala su relativno mali ulazni otpori
- instrumentacijsko pojačalo nema taj problem
- sklop:



$$i = \frac{U_{iz2} - U_{iz1}}{2R_1 + 2R_2} = \frac{U_{o12} - U_{o11}}{2R_1}$$

$$U_{iz2} - U_{iz1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) (U_{o12} - U_{o11})$$

$$U_{iz} = \frac{R_4}{R_3} (U_{iz2} - U_{iz1})$$

$$U_{iz} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) (U_{o12} - U_{o11})$$

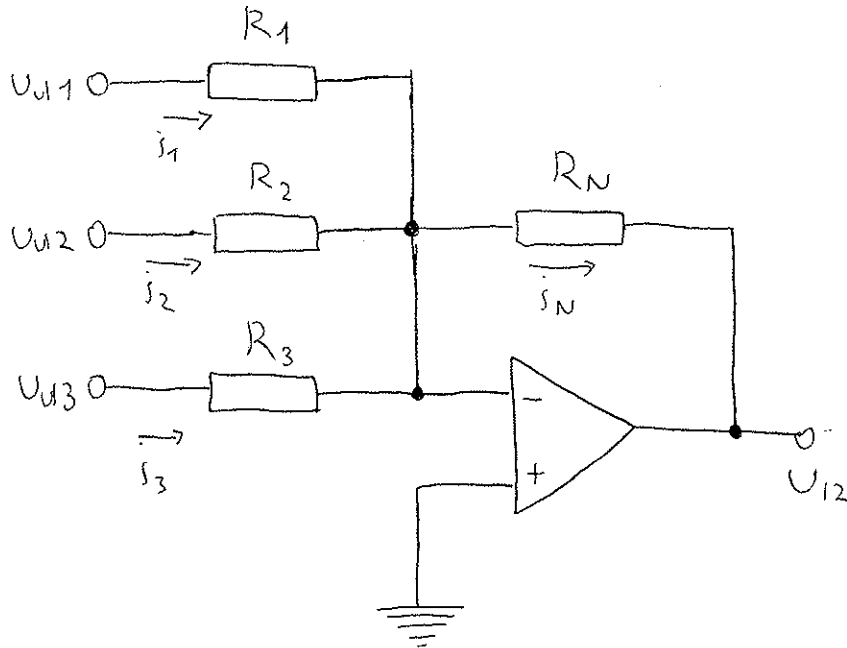
$$U_{o12} - U_{o11} = U_d$$

$$A_{vd} = \frac{U_{iz}}{U_d} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \text{diferencijsko pojaćanje}$$

* PRIMJENA OP. POJAČALA U OBAVLJANJU MATEMATIČKIH OPERACIJA

- matematičke operacije nad analognim signalima

• ZBRAJANJE



$$i_1 + i_2 + i_3 = i_N$$

$$\frac{U_{U1}}{R_1} + \frac{U_{U2}}{R_2} + \frac{U_{U3}}{R_3} = - \frac{U_{I2}}{R_N}$$

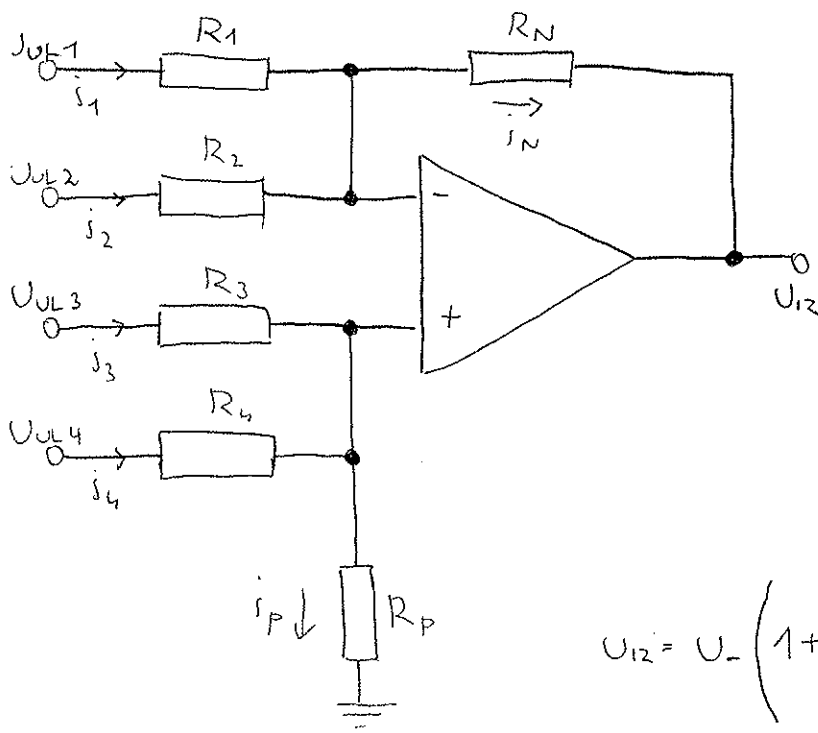
$$U_{I2} = - \left(\frac{R_N}{R_1} U_{U1} + \frac{R_N}{R_2} U_{U2} + \frac{R_N}{R_3} U_{U3} \right)$$

$$R_1 = R_2 = R_3$$

TEŽINSKI
FAKTORI

$U_{I2} = - \frac{R_N}{R_1} (U_{U1} + U_{U2} + U_{U3})$ - sklop obavlja funkciju zbrajanja

• ZBRAJANJE I ODUZIMANJE



$$\frac{U_{U3} - U_+}{R_3} + \frac{U_{U4} - U_+}{R_4} = \frac{U_+}{R_P}$$

$$U_+ \left(1 + \frac{R_P}{R_3} + \frac{R_P}{R_4} \right) = \frac{R_P}{R_3} U_{U3} + \frac{R_P}{R_4} U_{U4}$$

$$\frac{U_{U1} - U_-}{R_1} + \frac{U_{U2} - U_-}{R_2} = \frac{U_- - U_{I2}}{R_N}$$

$$U_{I2} = U_- \left(1 + \frac{R_N}{R_1} + \frac{R_N}{R_2} \right) - \frac{R_N}{R_1} U_{U1} - \frac{R_N}{R_2} U_{U2}$$

$$i_3 + i_4 = i_P$$

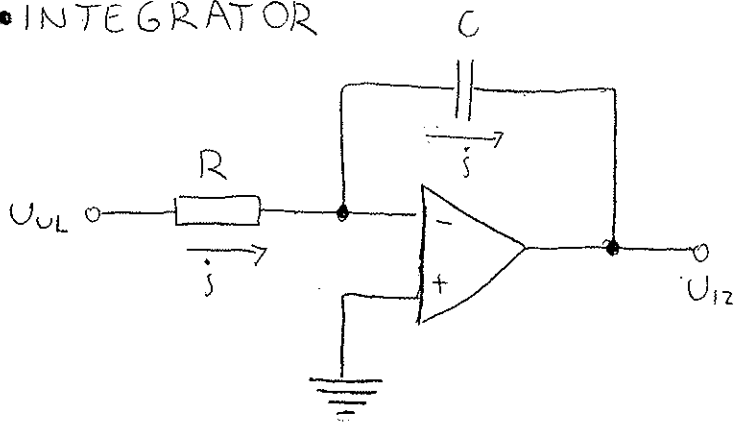
$$U_- = U_+$$

$$U_{I2} = -\frac{R_N}{R_1} U_{UL1} - \frac{R_N}{R_2} U_{UL2} + \frac{1 + \frac{R_N}{R_1} + \frac{R_N}{R_2}}{1 + \frac{R_P}{R_3} + \frac{R_P}{R_4}} \left(\frac{R_P}{R_3} U_{UL3} + \frac{R_P}{R_4} U_{UL4} \right)$$

- UZ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ i $R_P = R_N$:

$U_{I2} = \frac{R_N}{R_1} (-U_{UL1} - U_{UL2} + U_{UL3} + U_{UL4})$ - sklop obavlja funkciju zbrajanja i oduzimanja

• INTEGRATOR



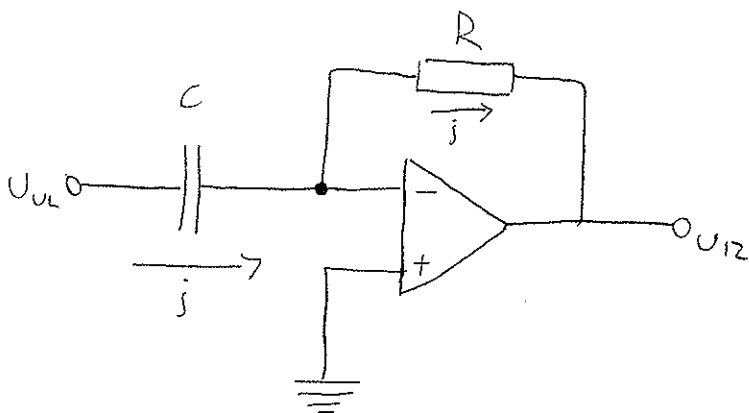
$$i(t) = \frac{U_{UL}(t)}{R}$$

$$U_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + U_{C0}$$

$$U_C(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{UL}(t) dt + U_{C0}$$

$U_{I2} = -U_C = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{UL}(t) dt - U_{C0}$ - sklop obavlja funkciju integriranja

• INTEGRATOR



$$i(t) = C \cdot \frac{dU_{UL}(t)}{dt}$$

$$U_{I2} = -U_R$$

$U_{I2}(t) = -RC \cdot \frac{dU_{UL}(t)}{dt}$ - sklop obavlja funkciju deriviranja

* MULTIVIBRATORI

- impulsni sklopovi koji mogu poprimiti jedno od 2 moguća stanja - stanje visoke ili niske razine
- stanje se mijenja vanjskom pobudom
- stanje sklopa može biti stabilno ili kvazistabilno
- STABILNO - u ovom stanju sklop može ostati trajno
- KVAZISTABILNO - sklop u ovom stanju može ostati samo određeno vrijeme i onda se sam prebaci u drugo stanje
- postoje 3 vrste multivibratora:
 - BISTABIL - oba stanja stabilna
 - MONOSTABIL - jedno stabilno, a drugo kvazistabilno stanje
 - ASTABIL - oba stanja su kvazistabilna

• POZITIVNA POVRAATNA VEZA

- u multivibratorima pojačala rade s pozitivnom povratnom vezom
- ovako spojeno pojačalo ne radi kao linearan sklop, nego izlazni napon poprima jedno od dva stabilna stanja - pozitivni ili negativni napon zasićenja

