

Sveučilište J.J. Strossmayera  
**Elektrotehnički fakultet Osijek**  
Kneza Trpimira 2b  
31000 Osijek

**STRUČNI STUDIJ**

v 1.2

Odgovori na pitanja iz kolegija

# **OSNOVE ELEKTRONIKE**

**NASTAVNIK:**

**Mr.sc. Slavko RUPČIĆ**

# Ispitna pitanja iz kolegija OSNOVE ELEKTRONIKE

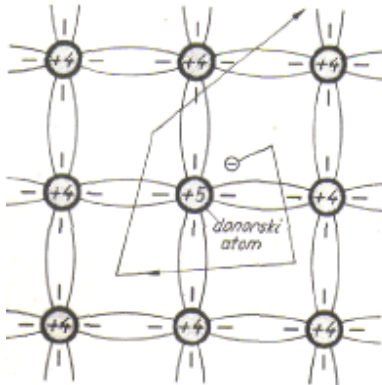
1. P i N tipovi poluvodiča.
2. PN spoj pod djelovanjem napona.
3. Karakteristike PN diode.
4. Spoj sa PN diodom - statika i dinamika.
5. PNP i NPN spoj poluvodiča - bipolarni tranzistor (BT).
6. Karakteristike bipolarnih tranzistora (ulazna i izlazne).
7. Pojačalo sa BT u spoju zajedničkog emitera - statika i dinamika.
8. Pojačalo sa BT u spoju zajedničkog kolektora - statika i dinamika.
9. Pojačalo sa BT u spoju zajedničke baze-statika i dinamika.
10. Emitterska degeneracija.
11. Ograničenja u radu tranzistora.
12. Odabir položaja statičke radne točke BT.
13. FET i MOSFET - izvedba i vrste.
14. Pojačalo sa FET u spoju zajedničkog uvoda (source-a) statika i dinamika.
15. Vrste pojačala i njihove karakteristike - strujna, naponska, otporna i strminska.
16. Pojačala snage.
17. Pojačala snage klase A.
18. Pojačala snage klase B.
19. Vrste povratne veze, primjer i svojstva NPV.
20. Operacijsko pojačalo (OP)- idealno i realno.
21. Invertirajuće i neinvertirajuće pojačalo s OP.
22. Sumator s OP uz invertiranje i bez invertiranja.
23. Integrator i derivator s OP.
24. Logaritamsko i eksponencijalno pojačalo s OP.
25. RC i LC sklopovi integratora i derivatora.
26. Diodni sklopovi za oblikovanje valnog oblika.
27. Bistabilni multivibrator, Schmitov bistabil
28. Monostabilni multivibrator.
29. Astabilni multivibrator.
30. **Millerov integrator.**
31. Familije (MOSFET,CMOS,TTL,DTL,RTL,DL)
32. Otpori, kondenzatori, otpornici
33. Kaskadni spojevi pojačala (Darlingtov spoj)
34. Analiza na VF "Giacolett-ov" model i Millerov torem
35. Područija rada BT
36. Ebers-Mollov model BT
37. Diferencijalno pojačalo
38. **A/D i D/A sklopovi**

# ODGOVORI:

## 1. P i N tipovi poluvodiča

Razlikujemo dva tipa poluvodiča:

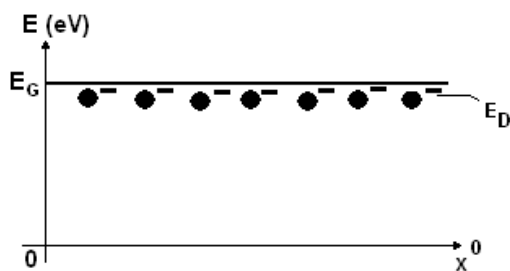
- **Poluvodiči N-tipa.** Taj tip poluvodiča nastaje kad se poluvodič onečisti ili dozira peterovalantnim nečistoćama, među koje spadaju *dušik* (N), *fosfor* (P), *arsen* (As) i *antimon* (Sb). Četiri elektrona peterovalentnog elementa nečistoće udružena su u valentne veze sa četiri susjedna germanijeva atoma. Peti elektron vezan je uz svoj atom jedino elektrostatskom privlačnom silom Coulombovog tipa.



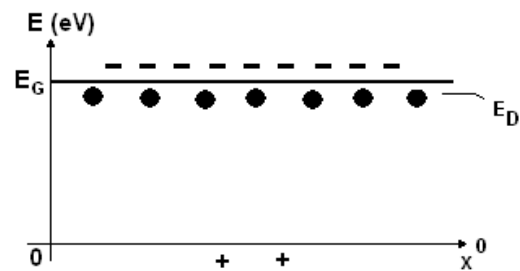
Shematski prikaz poluvodiča N-tipa

Budući da su energije ionizacije niske, već će i kod temperature od oko  $-150^{\circ}\text{C}$  na više većina nečistoća biti ionizirana što znači da već na vrlo niskim temperaturama će praktički svi elektroni koji potječu od atoma nečistoća biti u vodljivom pojasu i slobodno se gibati kroz kristal.

Peterovalentne nečistoće daju elektrone u vodljivi pojas, pa se zbog toga nazivaju **donorske nečistoće**. Ionizirani donor ima pozitivan naboj. Koncentracija šupljina bit će puno manja od koncentracije elektrona pa će većinski ili majoritetni nosioci bili elektroni, a šupljine će biti manjinski ili minoritetni nosioci. Poluvodič kome su dodane peterovalentne ili donorske nečistoće naziva se **poluvodič N-tipa**, zbog toga što su u njemu majoritetni nosioci elektroni, čestice negativnog naboja.



a) na temperturi APSOLUTNE NULE



b) na sobnoj temperaturi

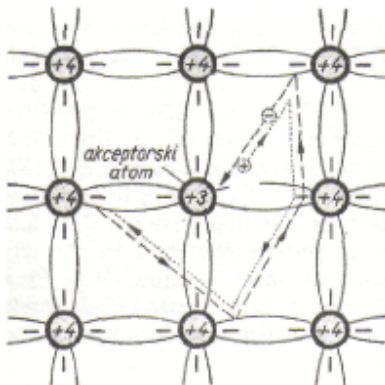
- $-$  donorski atom (-) elektron
- $+$  donorski ion (+) šupljina

- $E_D$  - donorski nivo
- $E_G$  - granična energija

Dijagram energetske pojasa poluvodiča N-tipa

U dijagramu energetske pojasa prisustvo donorskih nečistoća ima za posljedicu nastajanje dodatnog energetskog nivoa unutar zabranjenog pojasa, i to pri njegovom vrhu. Taj nivo se naziva **donorski nivo**  $E_D$ . Razlog zbog kojega donorski nivo mora ležati uz vrh zabranjenog pojasa slijedi automatski iz činjenice, da je za prebacivanje elektrona vezanih uz donorske atome u vodljivi pojas potreban vrlo mali iznos energije. Uslijed razbijanja valentnih veza postoje i šupljine u valentnom pojasu, što je također prikazano na slici.

• **Poluvodiči P-tipa.** Taj tip poluvodiča nastaje kad se poluvodič onečisti ili dozira, trovalentnim nečistoćama, među koje spadaju *bor* (B), *aluminij* (Al), *galijs* (Ga) i *indij* (In).



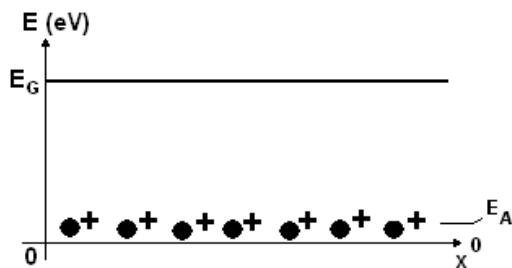
**Shematski prikaz poluvodiča P-tipa**

Trovalentnoj nečistoći nedostaje jedan elektron da kompletira valentnu vezu. Ona se kompletira na taj način da je popuni valentni elektron iz neke susjedne veze, čime se proces nastavlja. Budući da trovalentne nečistoće kompletiraju valentne veze primajući elektrone iz valentnog pojasa, nazivaju se **akceptorske nečistoće**. Energije ionizacije akceptorskih nečistoća su vrlo male i leže u istom intervalu energija kao i za donorske nečistoće. Kao i u poluvodiču N-tipa i u P-tipu postoji razbijanje valentnih veza, čiji je intenzitet određen temperaturom.

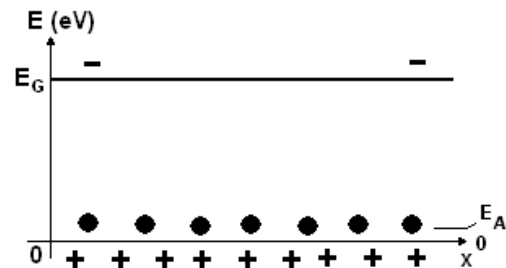
U poluvodiču P-tipa su pozitivne šupljine majoritetni nosioci, odatle i naziv P-tip, a elektroni su minoritetni nosioci.

Akceptorske nečistoće uvode u dijagram energetskih pojasa dodatni **akceptorski nivo**  $E_A$ , koji leži unutar zabranjenog pojasa. Budući da se akceptorske nečistoće lako ioniziraju primajući elektrone iz valentnog pojasa, mora akceptorski nivo le-

žati pri dnu zabranjenog pojasa. Akceptorski atom primajući elektron postaje negativan ion. Na taj način se stvara šupljina u valentnom pojasu, pa se može također reći da akceptorski atom vezuje šupljinu, a ionizacijom je daje u valentni pojas.



a) na temperaturi APSOLUTNE NULE



b) na sobnoj temperaturi

●<sup>+</sup> akceptorski atom (+) šupljina  
● akceptorski ion (-) elektron

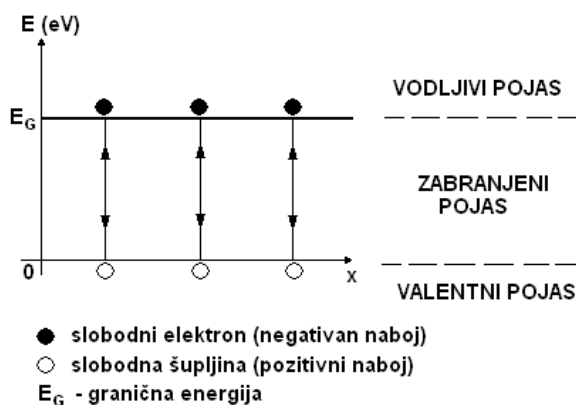
$E_D$  - akceptorski nivo  
 $E_G$  - granična energija

### Ostalo:

**Intrinsični poluvodič** (čist) je poluvodič čija se kristalna rešetka sastoji samo od atoma jednog elementa, bez ikakvih primjesa.

**Ekstinskični poluvodič** (primjesni) je poluvodič kod kojeg električka svojstva (u prvom redu električka vodljivost) ovise o prisustvu nekog stranog elementa.

**Razbijanje kovalentne veze** je proces u kojem se elektron iz valentnog pojasa prebaci u vodljivi pojas jer pri temperaturi većoj od 0K postoji vjerojatnost da valentna veza zahvati kvant energije  $h \cdot f > E_G$  koji potječe od vibracije kristalne rešetke koja nastaje pri gibanju elektrona ili šupljina kroz kristalnu rešetku.



● slobodni elektron (negativan naboj)  
○ slobodna šupljina (pozitivan naboj)  
 $E_G$  - granična energija

**DOPIRANJE** je postupak namjernog ubacivanja nečistoća u kristalnu rešetku atoma.

Ubacivanje 3-valentne (za P-tip) ili 5-valentne nečistoće (za N-tip).

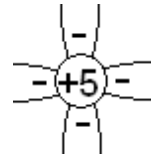
U kristalnu rešetku ubacujemo od  $10^{12}$  do  $10^{15}$  atoma nečistoća u  $1 \text{ cm}^{-3}$ .

**DEGENERIRANI POLUVODIČ**- je poluvodič koji sadrži  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ili više atoma nečistoća.

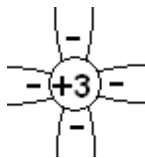
Ilustracija nastajanja parova nosilaca u dijagramu energetske pojasa

**DONORI** su atomi koji doniraju elektron. To su najčešće slijedeći elementi: dušik, fosfor, antimon i arsen.

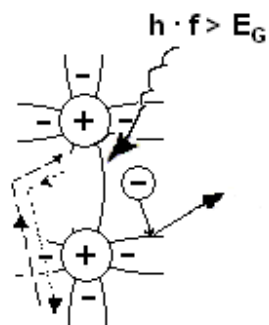
Donorski atom



**AKCEPTORI** su atomi koji primaju elektron i postaju negativni ion. Na taj način stvaraju šupljinu u valentnom pojasu. To su najčešće slijedeći elementi: bor, aluminij, indij i galij.

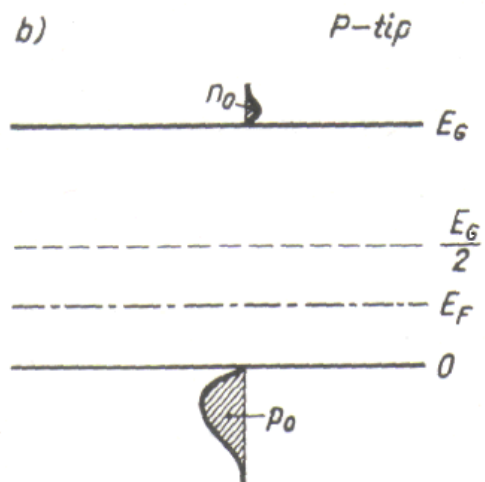
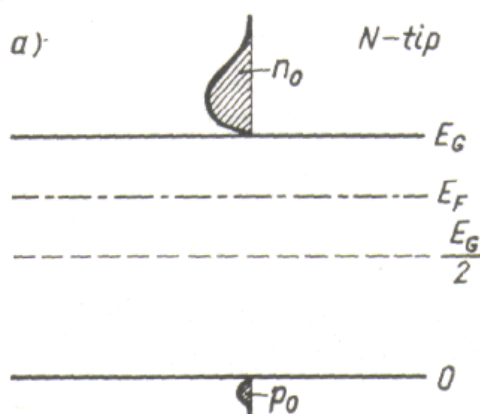


Akceptorski atom



Shematski prikaz projekcije modela kristalne rešetke intrinzičnog Ge ili Si na konačnoj temperaturi s ilustracijom rezbijanja kovalentne veze

..... gibanje šupljina  
 - - - - - gibanje valentnih elektrona  
 ————— gibanje slobodnih elektrona



Položaj Fermijevog nivoa u poluvodiču N-tipa i P-tipa

$p_0$  - ravnotežna koncentracija šupljina

$n_0$  - ravnotežna koncentracija elektrona

N-tip: -velika koncentracija elektrona u vodljivom pojasu

-mala koncentracija šupljina u valentnom pojasu

Fermijeva energija je bliže vodljivom pojasu u kojem se nalazi velik broj elektrona.

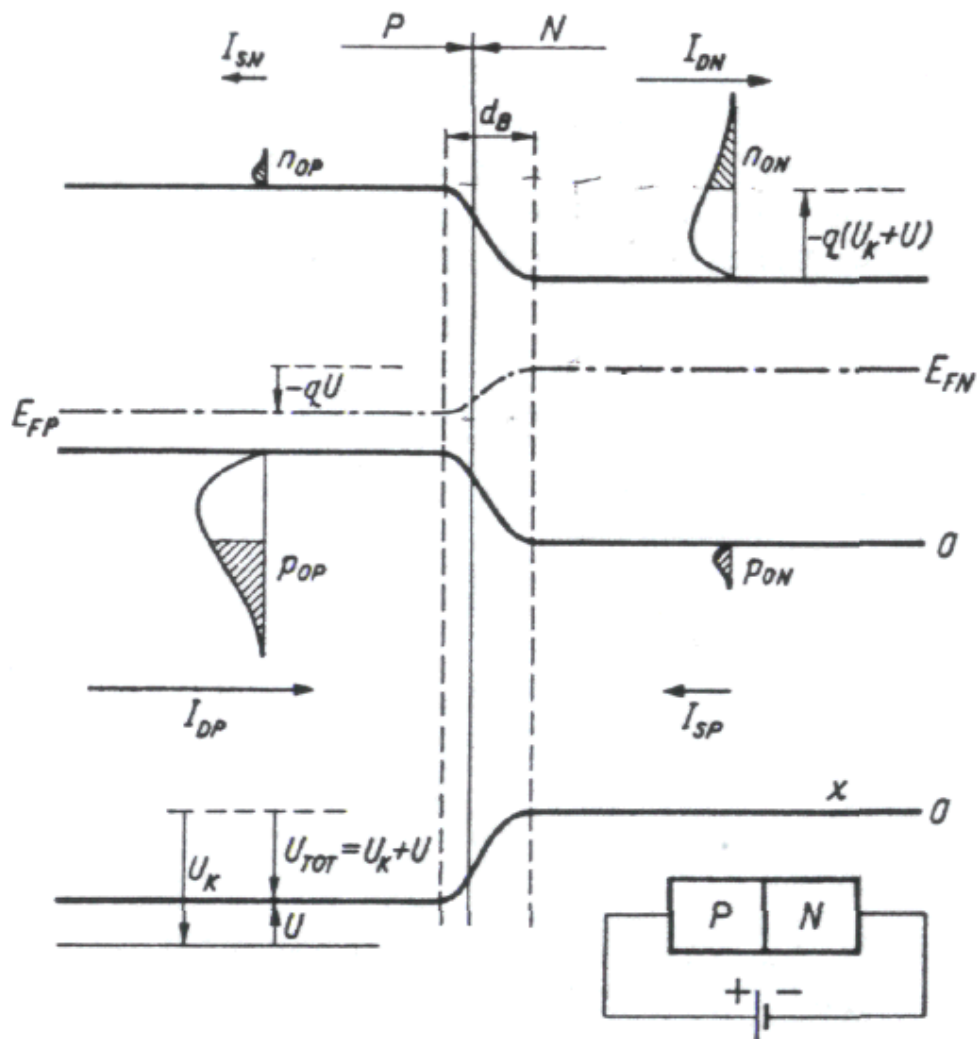
P-tip: -mala koncentracija šupljina u vodljivom pojasu

-velika koncentracija elektrona u valentnom pojasu

Fermijeva energija je bliže valentnom pojasu u kojem se nalazi velik broj šupljina.

## 2. PN spoj pod djelovanjem napona

### a) propusna polarizacija



**Energetski dijagram PN spoja kada je poluvodič P-tipa priključen plus pol napona (propusna polarizacija)**

Potencijalna barijera postaje manja u odnosu na ravnotežno stanje. Zbog toga se u slučaju kad je plus pol vanjskog napona priključen na P-tip difuzija većinskih nosilaca olakšava, pa će doći do pojačane injekcije elektrona na P-stranu i šupljina na N-stranu. To će imati za posljedicu znatan porast difuzionih struja  $I_{DN}$  i  $I_{DP}$ , koje se međusobno potpomažu. Većinski nosioci koji mogu difundirati preko barijere označeni su šrafičanim površinama. Za struje manjinskih nosilaca  $I_{SN}$  i  $I_{SP}$  se nije ništa promijenilo u odnosu na ravnotežno stanje, jer za njih barijera ne postoji. Struje  $I_{DN}$  i  $I_{DP}$  će prevladati struje  $I_{SN}$  i  $I_{SP}$  i struja kroz P-N spoj će teći. Lako je zaključiti da će struja biti to veća što je potencijalna barijeramanja. Ukupni napon na P-N barijeri je  $U_{TOT}$  i on je jednak sumi kontaktnog potencijala i vanjskog napona.

$$U_{TOT} = U_K + U \quad (1.)$$

N-strana je uzeta za referentnu, pa  $U_{TOT}$  znači ukupni napon P-strane prema N-strani. Kontaktni potencijal je negativan, pa napon  $U_{TOT}$  postaje iznosom manji ukoliko je vanjski napon  $U$  pozitivan, tj. ako je plus pol napona  $U$  priključen na P-stranu. Budući da je uz takvu polarizaciju barijera smanjena,

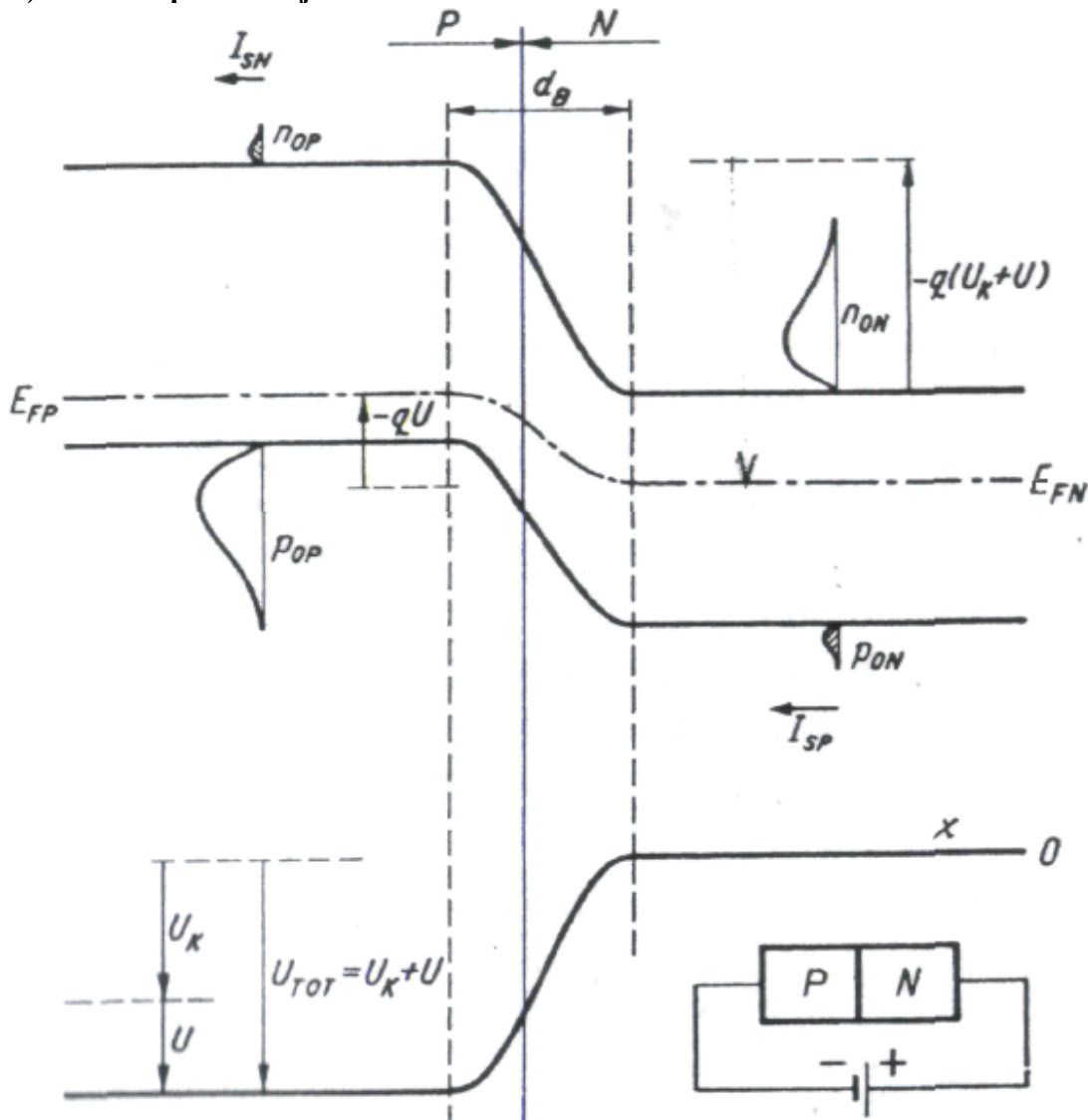
naziva se ta polarizacija **propusna polarizacija**  $P$ - $N$  spoja. Općeniti) se za struju propusne polarizacije može pisati:

$$I = I_{DN} + I_{DP} - I_{SN} - I_{SP} = I_D - I_S$$

Za sada se još ne može reći kakva će biti ovisnost struje o priključenom naponu, ali je očito da će ona biti to veća što je napon propusne polarizacije viši. U dijagramu energetskih pojasa se priključak vanjskog napona  $U$  manifestira kao dislokacija energetskih nivoa  $P$ -strane za iznos  $-qU$ .

Prema tome, Fermijevi nivoi  $P$  i  $N$  strane nisu više isti, nego međusobno pomaknuti za spomenuti iznos. Uz propusnu polarizaciju dolazi do pojačanog ubacivanja većinskih nosilaca preko barijere, koji prelaze na onu stranu gdje predstavljaju anjinske nosioce, pa se taj proces naziva **injekcija minoritetnih** ili **manjinskih ncsilaca**. On predstavlja osnovu rada  $P$ - $N$  dioda i tranzistora.

## b) reverzna polarizacija



**Energetski dijagram PN spoja kada je poluvodič P-tipa priključen minus pol (nepropusna polarizacija)**



U slučaju da je minus pol vanjskog napona priključen na P-stranu, potencijalna barijera bit će veća, tj. napon  $U_{TOT}$  postaje iznosom viši. Za  $U_{TOT}$  opet vrijedi relacija (1.). Iz dijagrama energetskih pojasa je očito da će zbog visine potencijalne barijere difuzija većinskih nosilaca preko barijere biti praktički onemogućena. Postojat će samo struja manjinskih nosilaca, koja je vrlo mala i koja — kao što se vidi ne ovisi o naponu. Budući da uz takvu polarizaciju postoji samo mala struja manjinskih nosilaca, naziva se ta polarizacija **reverzna** ili **nepropusna polarizacija P-N spoja**.

Za struju P-N spoja vrijedi sada relacija:

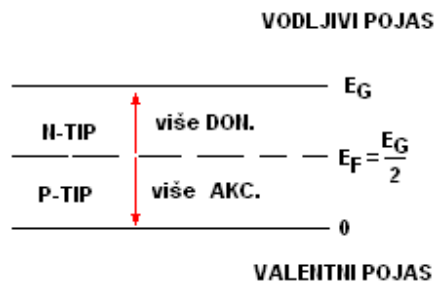
$$I = -I_{SN} - I_{SP} = -I_S$$

Budući da struja reverzne polarizacije ne ovisi o naponu, naziva se **reverzna struja zasićenja**.

U danom prikazu pretpostavljeno je da se sav pad napona odigrava na P-N barijeri, tj. da nema pada napona duž električki neutralnih dijelova poluvodiča P- i N-tipa koji se nadovezuju na barijeru. U prikazu energetskih pojasa to se očituje na taj način da su pojasi P- i N-područja van barijere horizontalni. U slučaju nepropusne polarizacije zbog vrlo male struje ta je tvrdnja praktički sasvim točna. Za orijentaciju je važno znati da se potencijalna barijera nikada ne može u potpunosti eliminirati, što bi slijedilo iz jednadžbe (1.), ako je  $U > -U_K$ . Spomenuta jednadžba ne vodi računa o padovima napona izvan barijere, do kojih dolazi kod viših napona propusne polarizacije.

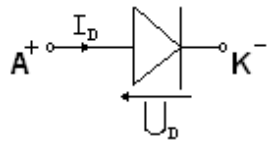
**Fermijeva energija** je energija čija je vjerojatnost zaposjedanja 50%.

Zaposjedanje ovisi o koncentraciji nečistoća. Nema donorski niti akceptorski efekt.



### 3. Karakteristike PN diode

PN dioda je element koji se sastoji od jednog PN spoja. Izrađuje se od kristala germanija i silicija.



Izvod povezan s P-tipom je anoda (A), a izvod povezan sa N-tipom je katoda (K). Ovaj element je tipičan primjer nelinearnog dvopola.

Dioda ima svojstvo da ne vodi struju u oba smjera jednako. Ukoliko je dioda priključena u el. krug tako da je anoda pozitivnija od katode, kroz diodu će prolaziti struja (kažemo da je dioda propusno polarizovana). U slučaju obrnutog priključka (zaporna polarizacija) kroz diodu će teći zanemarivo

mala struja. **Nejednako vođenje struje u diodi u odnosu na polaritet priključenog napona je osnovna karakteristika diode.** Ovaj element je tipičan primjer nelinearnog dvopola.

Karakteristika pn-diode može se u statičkim uvjetima rada dobro opisati poznatom

**Shockley-evom diodnom jednačinom:**

$$I_D = I_S \left( \exp \frac{U_D}{m \cdot U_T} - 1 \right)$$

gdje je:

$I_D$  ... struja kroz diodu

$U_D$  ... napon na diodi

$I_S$  ... reverzna struja zasićenja (saturacije) Struja koja prolazi kroz diodu kada je nepropusno polariziramo.

$U_T$  ... naponski ekvivalent temperature  $U_T = \frac{k \cdot T}{q}$  ( $U_{TSi} = 25mV$ ), ili temperaturna ovisnost pn

dioda. To nije "pravi" napon iako se mjeri u voltima jer je jedina varijabla temperatura T (Kelvin) dok je k Boltzmannova konstanta i q naboj elektrona (također konstanta)

m... koeficijent ovisan o iznosu struje kroz diodu; kod silicijevih pn-dioda kod malih i velikih struja m=2, a kod srednjih struja m=1.

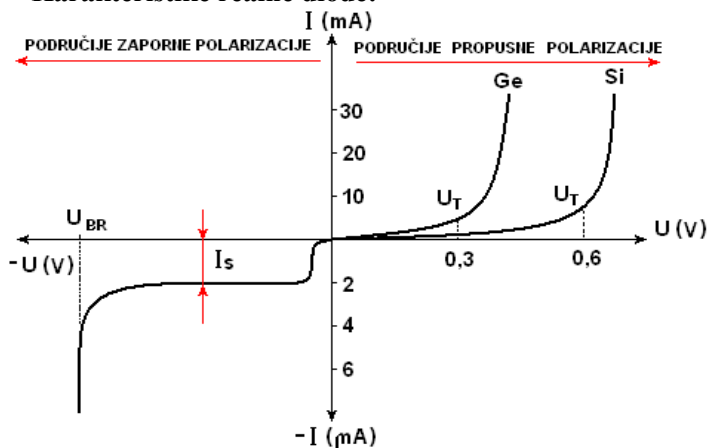
Raspisivanjem naponskog temperaturnog ekvivalenta jednačinu možemo zapisati:

$$I_D = I_S \left( \exp \frac{qU}{k \cdot T} - 1 \right)$$

**Shockley-eva jednačina** dobro opisuje I-U karakteristiku realnih PN dioda, a također i ulazne karakteristike bipolarnih tranzistora, posebno kada se može zanemariti utjecaj Earleveva efekta na ulazne karakteristike. I-U karakteristike pokazuju kako se mijenja struja neke elektrode u ovisnosti o naponu te iste ili neke druge elektrode.

Zapornom polarizacijom ostvaruje se između dvaju vodljivih područja p i n nevodljivo područje prostornog naboja.

**Karakteristike realne diode:**



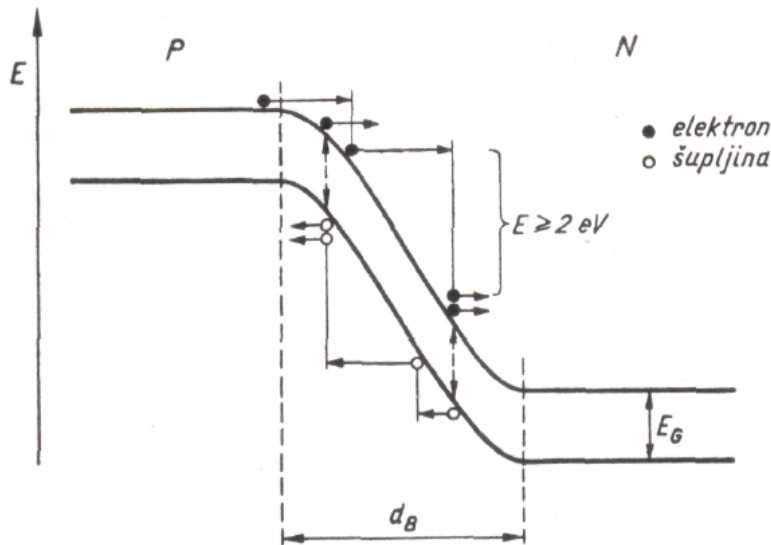
Karakteristični naponi:

$U_T$  -napon praga

$U_{BR}$  -napon proboja

Porastom temperature pucaju kovalentne veze stoga raste struja kroz diodu. Razlika napona praga silicijske i germanijumske diode je posljedica različite širine zabranjenog pojasa (širi kod Si za 0.3eV)

## Lavinski proboj



Ilustracija mehanizma lavinskog proboja

tzv. **ionizacioni koeficijent**  $a_i$ . On daje prosječni broj parova elektron-šupljina, stvorenih od jednog elektrona ili šupljine na putu od 1 cm.. Efikasnost ionizacije, a time i struja u području lavinske multiplikacije, biti će to veći što je kod neke određene diode viši napon, jer su i jakost polja i put duž koga se ionizacija obavlja, tj. širina  $P-N$  barijere veći.

**Faktor lavinske multiplikacije**  $M$  definiran je kao kvocijent broja elektrona ili šupljina koji prođu kroz barijeru kad postoji multiplikacija naprema broju elektrona ili šupljina koji kroz barijeru prođu kad nema multiplikacije, kod nižih napona. Kako je kvocijent broja nosilaca u isto vrijeme i kvocijent struja, vrijedi relacija:

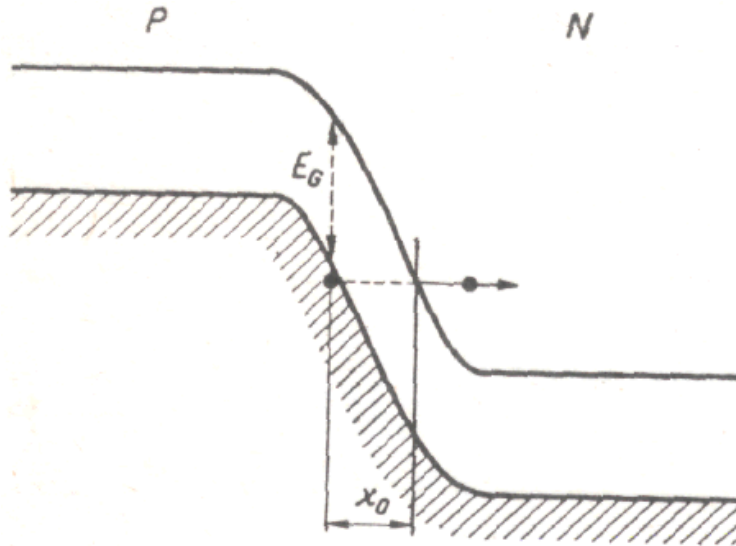
$$M = \frac{I'_s}{I_s}$$

gdje je  $I'_s$  reverzna struja kod viših napona kad postoji multiplikacija, a  $I_s$  reverzna struja kod nižih napona kad multiplikacije nosilaca nema..

Kod širih barijera manjinski (mirioritetni) nosioci koji slobodno prolaze preko barijere mogu kod većih jakosti polja zadobiti dovoljne brzine da razbijaju valentne veze unutar barijere. Na taj način se stvaraju dodatni parovi elektron-šupljina, koji doprinose porastu struje. Taj proboj se naziva **lavinski proboj**. Pojedini nosioci mogu postići i veće energije, odnosno brzine, pa kada energija nosioca prijeđe 2 eV (u siliciju), ona je dovoljna da razbije valentnu vezu i stvori par elektron-šupljina. Važan teoretski parametar lavinskog proboja, pomoću kojega se određuje probojni napon  $U_{PR}$ , je

## Zenerov proboj

Vrijednost napona  $U_{PR}$  kod kojeg dolazi do praktički skokovitog porasta struje naziva se *probojni napon*, a pojave koje dovode do toga objašnjavaju se svojstvima, odnosno probojem  $P$ - $N$  barijere.



Ilustracija Zenerovog tuneliranja

veća što je dužina  $x_0$ , kroz koju elektron mora protunelirati, manja. Proboj takvog tipa naziva se kod poluvodiča **Zenerov proboj**.

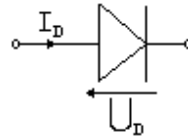
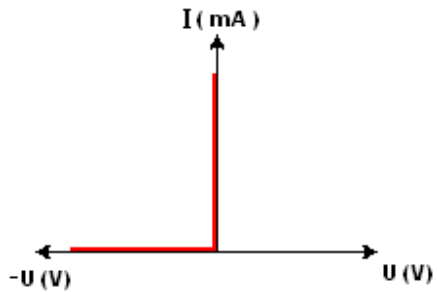
Zaključno se može reći da kod dioda čiji je probojni napon manji od 5 V dominira Zenerov efekt, a kod dioda čiji je probojni napon veći od 8 V dominira la-vinski efekt. U intervalu probojnih napona od 5 do 8 V oba mehanizma djeluju u značajnijoj mjeri simultano.

Kod vrlo uskih barijera, koje se dobivaju vrlo jakim onečišćenjem poluvodiča  $P$  i  $N$ -tipa, može doći do **tuneliranja** valentnih elektrona kroz barijeru. Ta pojava se, objašnjava valnom prirodom elektrona. Efekt je u biti isti kao kod tuneliranja elektrona kroz potencijalnu barijeru na granici metal-vakuum, do kojeg dolazi kad na površini metala djeluje vrlo jako polje. Da bi elektroni iz valentnog pojasa  $P$ -strane tunelirali u vodljivi pojas  $N$ -strane moraju postojati slobodni energetske nivoi na istom nivou energije koji elektroni imaju na  $P$ -strani prije tuneliranja. Vjerojatnost tuneliranja će biti to

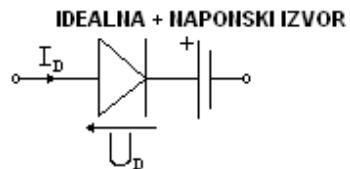
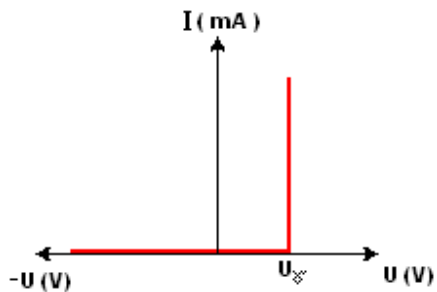
### Modeli idealne diode:

- **Idealna dioda** – najvažnija karakteristika idealne diode je da vodi pri 0V

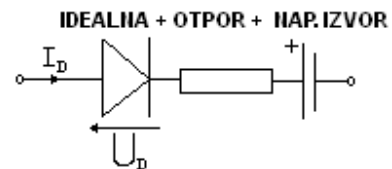
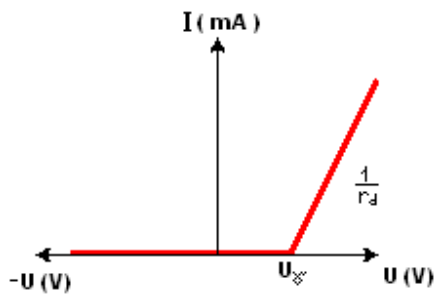
#### SIMBOL IDEALNE DIODE



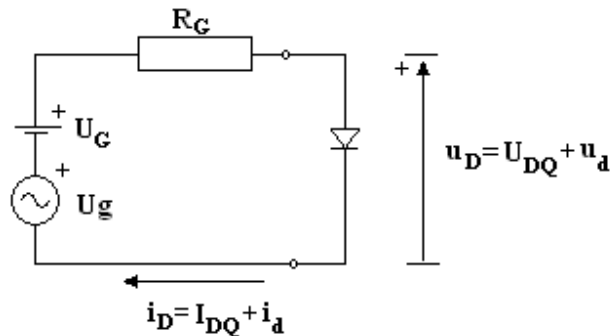
- **Konstantni pad napona** – da bi dioda provela treba napon veći od napona praga ( $U_\gamma$ )



- **Baterija + otpor**



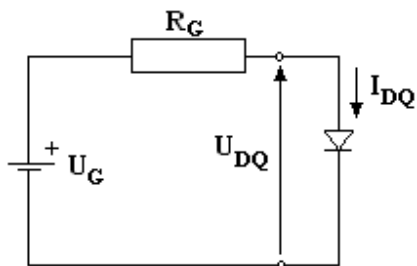
#### 4. Spoj s PN diodom – statika, dinamika



Strujni krug s pn diodom i s istosmjernim i izmjeničnim naponskim izvorom

##### STATIKA:

Pri statičkoj analizi promatramo istosmjerne napone i struje želeći odediti statičku radnu točku (Q) pn diode. Izmjenični izvor pri statičkoj analizi predstavlja kratak spoj dok kondenzator prekid strujnog kruga.



$I_{DQ}$  -istosmjerna struja koja teče kroz diodu u SRT

$U_{DQ}$  - istosmjerni napon na diodi u SRT

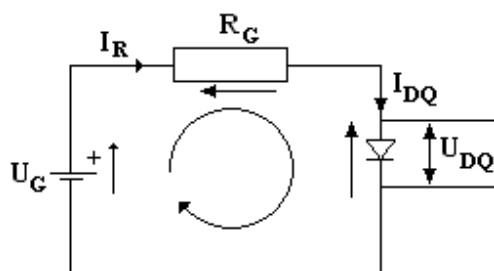
Ova dva parametra zajedno čine staričku radnu točku pn diode:

$$Q(I_{DQ}, U_{DQ})$$

Poznati parametri:  $I_S$  -struja zasićenja (saturacije),  $U_G$  -iznos istosmjernog napona,  $m$ - koeficijent ovisan o iznosu struje kroz diodu ( $m=1$ ),  $U_T$  - naponski ekvivalent temperature

Tražimo: Q-statičku radnu točku diode (struju i napon na diodi)

##### ANALITIČKI:



Koristićemo Schokley-jevu jednadžbu:

$$I_D = I_S \left( \exp \frac{U_D}{m \cdot U_T} - 1 \right)$$

II kirchoffov zakon (jednadžba strujnog kruga) predstavlja jednadžbu **statičkog radnog pravaca:**

$$U_G - (I_R \cdot R_G) - U_D = 0 \dots (1)$$

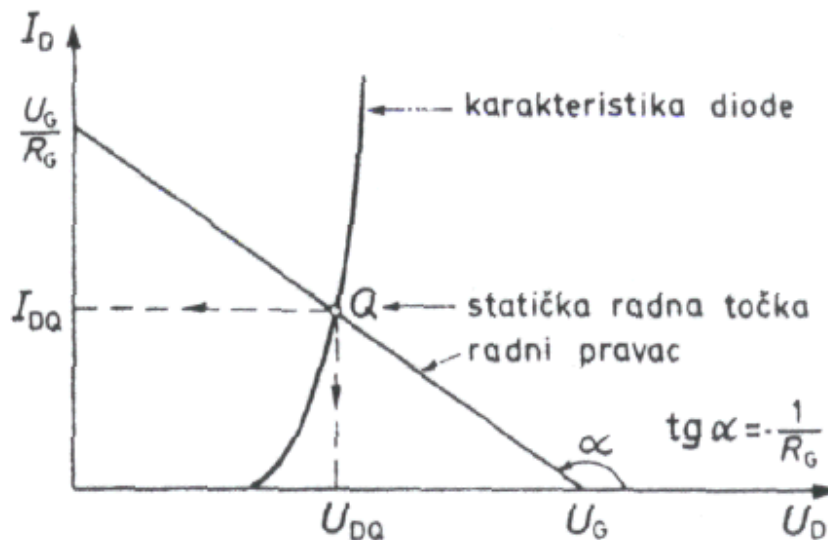
Kako je struja kroz otpornik ujedno i struja kroz diodu ( $I_R = I_D$ ) jednadžba SRP je:

$$U_G - (I_D \cdot R_G) - U_D = 0$$

### GRAFIČKI:

Na I-U diagramu prvo ćemo ucrtati Shokley-jevu diodnu jednadžbu. Zatim ćemo ucrtati statički radni pravac. Vrijednost napona na diodi  $U_D$  dobićemo tako što ćemo pretpostaviti iz (1) da je  $I_D = 0$  te dobiti da je  $U_G = U_D$  zatim tu vrijenost ucrtati na apcisu I-U diagrama.

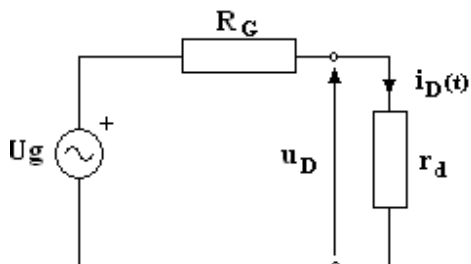
Vrijednost na ordinati istog dijagrama je struja kroz diodu koju ćemo dobiti iz (1) tako da pretpostavimo da je  $U_D = 0$  iz čegaproizilazi da je  $I_D = \frac{U_G}{R_G}$ .



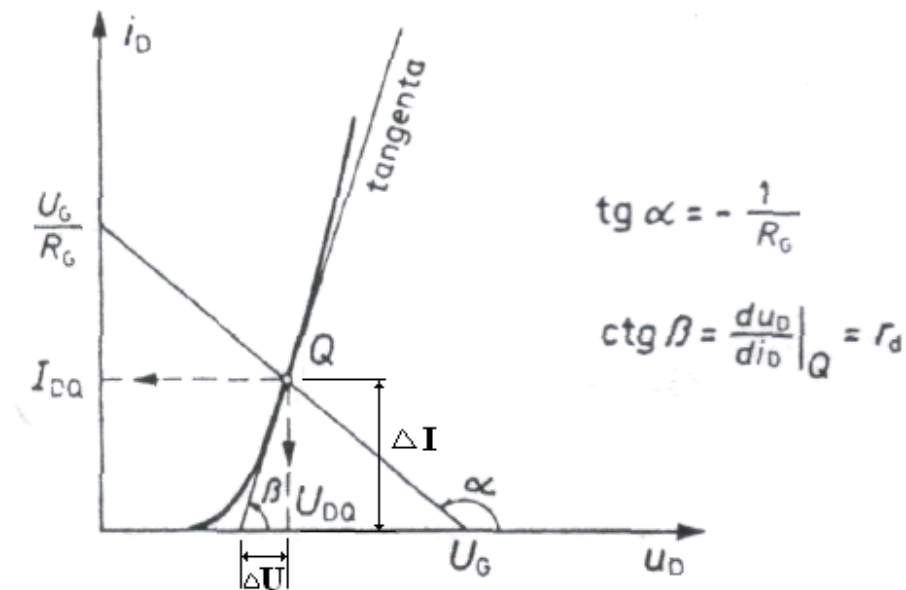
**Grafičko određivanje statičke radne točke nelinearnog elementa**

### DINAMIKA:

Pri visokim frekvencijama u dinamičkoj analizi diodu mjenjamo modelom (otpornikom  $r_d$ )



Dinamički otpor diode dobićemo tako što prvo odredimo SRT diode. Zatim ucrtamo tangenu na Shokley-jevu jednadžbu u SRT. Vrijednost kotangensa nagiba tangente je isti vrijenosti dinamičkog otpora diode.

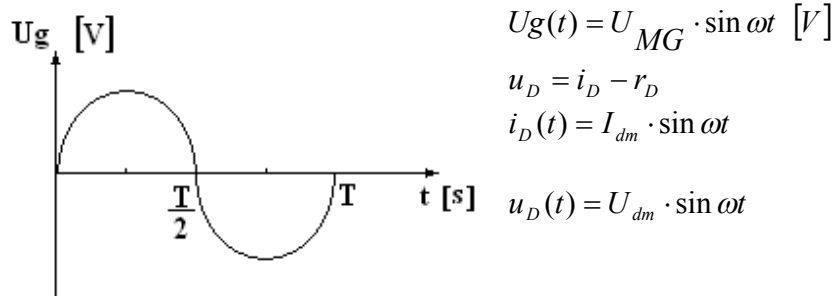


### Radni pravac za gore prikazan strujni krug

Vrijednost dinamičkog otpora možemo zapisati:

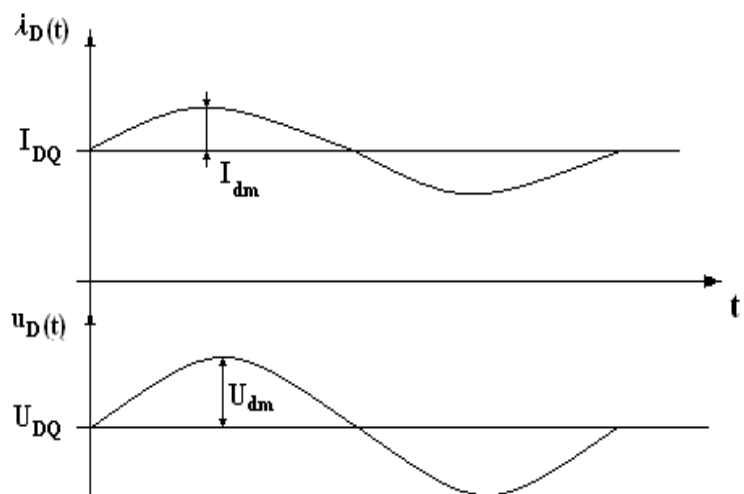
$$r_d = \left. \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|_Q = \frac{m \cdot U_T}{I_{DQ} + I_S} \approx \frac{U_T}{I_{DQ}}$$

Dinamički otpor se mijenja s promjenom SRT.



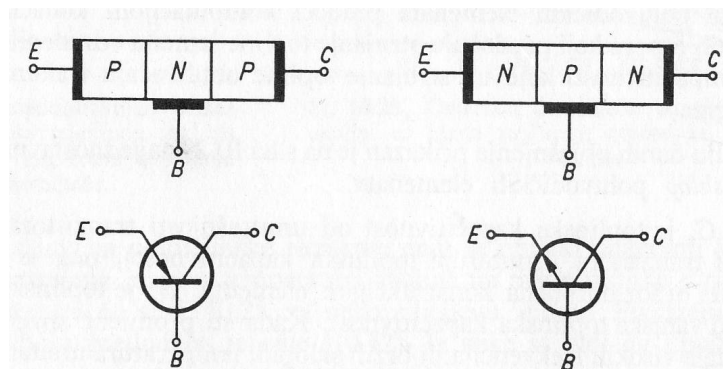
$$\begin{aligned} i_D(t) &= \boxed{I_{DQ}} + \boxed{i_d(t)} \\ u_D(t) &= \boxed{U_{DQ}} + \boxed{u_d(t)} \end{aligned}$$

STAT.      DINAM.





## 5.PNP i NPN spoj poluvodiča BT



PNP spoj

NPN spoj

Područja na krajevima jesu emiter (E) i kolektor (C), a u sredini baza (B). Obično je emiter najjače dopiran, baza je najtanja, a kolektor najmasivniji. Ako se svaki zaporni sloj prikaže simbolom diode, raspored zapornih slojeva je:

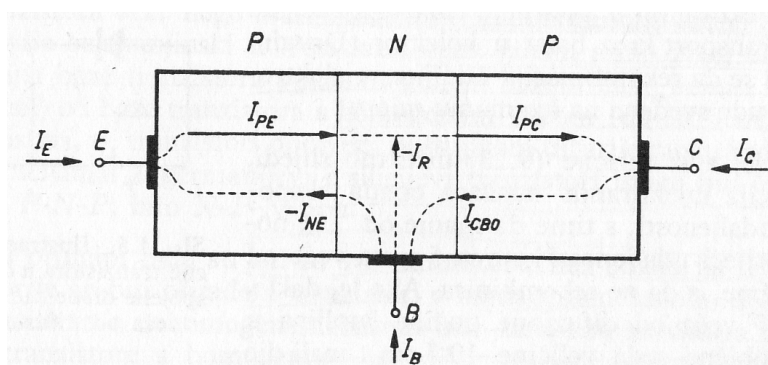
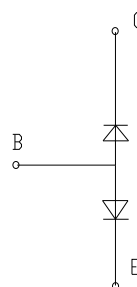
Primjena prvog Kirchhoffova zakona daje:

$$I_E = I_B + I_C$$

$$U_{BE} = 0,7 \rightarrow \text{u većini slučajeva}$$

Upravljački (ulazni) strujni krug obuhvaća elektrode, bazu i emiter, a radni (izlazni) kolektor i emiter. Da bi tekla struja, potrebna je propusna polarizacija bazno-emitorske barijere.

U emiteru n-p-n tranzistora većinski nosioci su elektroni i gibaju se preko propusno polarizirane barijere B-E. Većinski nosioci kod p-n-p tranzistora koji prolaze iz emitera jesu šupljine. Način djelovanja i svojstva p-n-p tranzistora komplementarni su onima u n-p-n.



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

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

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

Prikazan je stvarni smjer struje  $I_{PC}$ .

$I_{CBO}$  je mala reverzna struja zasićenja nepropusno polariziranog spoja kol.-baza.

Stvarni smjer joj je suprotan.

$I_{NE}$  predstavlja elektrone koje baza injektira u emiter.

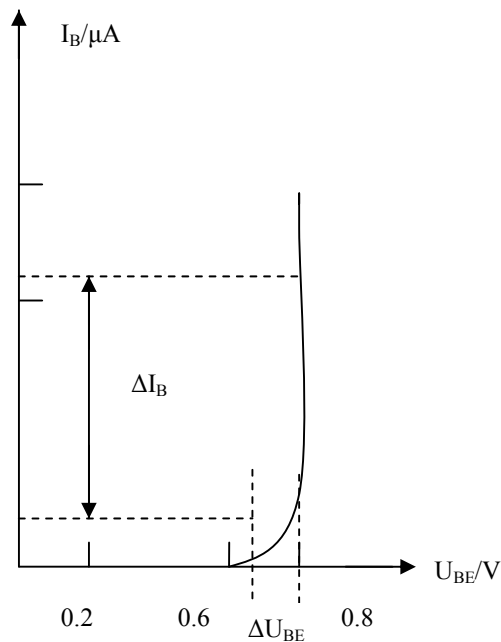
#### Komponente struja normalno polariziranog tranzistora

4 moguća radna područja tranzistora:

1. Normalno aktivno područje:  $U_{EB} > 0$ ;  $U_{CB} < 0$ . Emiter je polariziran propusno a kolektora nepropusno.
2. Inverzno aktivno područje:  $U_{EB} < 0$ ;  $U_{CB} > 0$ . Uloge emitera i kolektora su izmijenjene.
3. Područje zasićenja:  $U_{EB} > 0$ ;  $U_{CB} > 0$ . Obje barijere su propusno polarizirane.
4. Zaporno područje:  $U_{EB} > 0$ ;  $U_{CB} < 0$ . Obje barijere su nepropusno polarizirane.

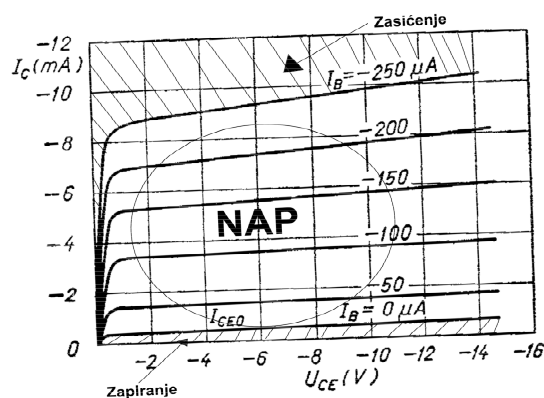
## 6. Karakteristike bipolarnog tranzistora (ulazno i izlazne kar.)

### ULAZNE KARAKTERISTIKE U SPOJU ZE



Pokazuju međusobnu ovisnost struje baze  $I_B$  i napona između baze i emitera  $U_{BE}$  uz stalan  $U_{CE}$ . Iz karakteristike se vidi da struja baze počinje teći tek kad  $U_{BE}$  ima određeni iznos (za Si 0,5V). Promjena napona  $U_{CE}$  vrlo malo utječe na iznos struje  $I_B$ . Omjer  $U_{BE}$  i pripadne struje  $I_B$  istosmjerni je otpor između baze i emitera tranzistora.  $R_{BE}$  treba razlikovati od otpora za izmj. Struju – DINAMIČKI OTPOR  $h_{ie}$ . Može se dobiti iz ulaznih karakteristika tran. Kao omjer male promjene napona između baze i emitera  $U_{BE}$  i time izazvane male promjene struje baze  $I_B$ . S obzirom na zakrivljenost karakter. otpor  $r_{be}$  mijenjat će se s promjenom struje baze  $I_B$ .

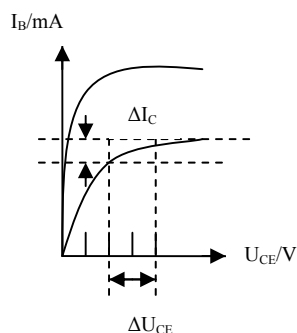
### IZLAZNE KARAKTERISTIKE U SPOJU ZE



Pokazuje ovisnost kolektorske struje  $I_C$  o naponu između kolektora i emitera  $U_{CE}$  i struje baze  $I_B$ . Iz karakteristike se vidi da se za male napone  $U_{CE}$  struja kolektora vrlo naglo mijenja – PODRUČJE zasićenja. Daljnjim povećanjem  $U_{CE}$ ,  $I_C$  mijenja se vrlo malo – AKTIVNO PODRUČJE. Uz struju  $I_B=0$  kroz tranz. Teče vrlo mala kolektorska struja – PREOSTALA STRUJA KOLEKTORA  $I_{CE0}$  pa se ona može zanemariti i kaže se da je tranz. U području zapiranja.

$I_B \cdot h_{fe} = I_C$ ;  $I_B$  su ulazne struje

Određivanje parametara iz izlazn. karakt.

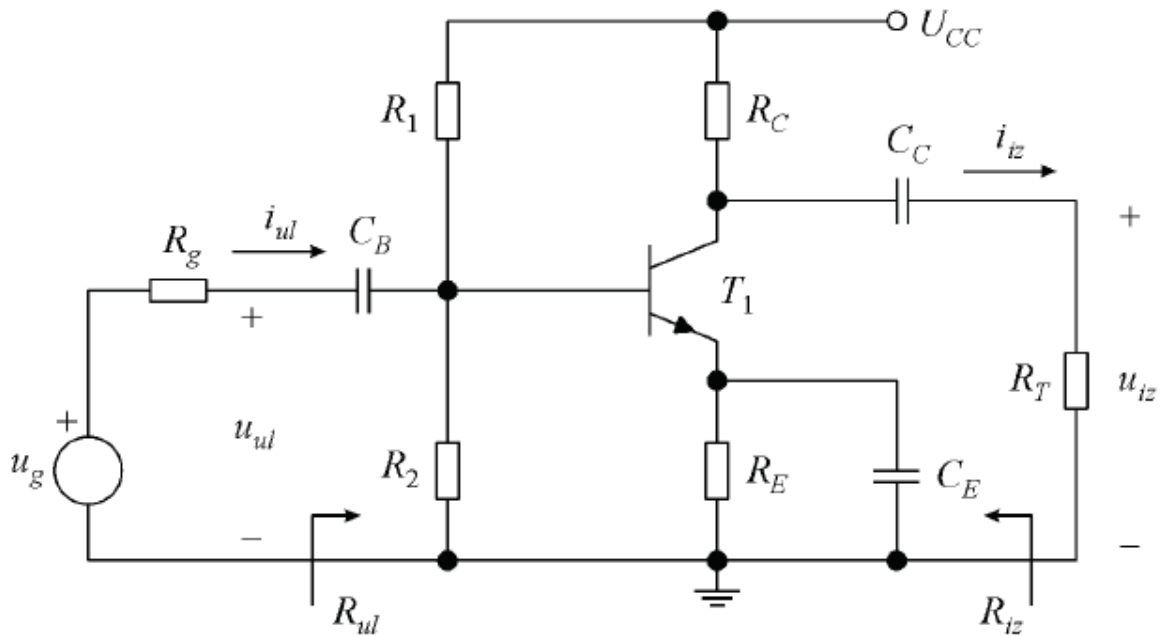


Omjer male promjene struje  $I_C$  i male promjene napona  $U_{CE}$  koji je uzrokovao promjenu kolektorske struje uz stalnu struju baze čini IZLAZNU DINAMIČKU VODLJIVOST TRANZ.  $h_{oe}$ . Recipročna vrijednost izl. vod. je IZLAZNI DINAMIČKI OTPOR  $r_{ce\text{tranz.}}$ .

Sve što je rečeno za NPN tranz. vrijedi i za PNP ali uz promijenjeni polaritet napona i smjer struja.

Statički radni otpor: 
$$R_u = \frac{U_{BE}}{I_B}$$

## 7. Pojačalo sa bipolarnim tranzistorom u spoju zajednickog emitera

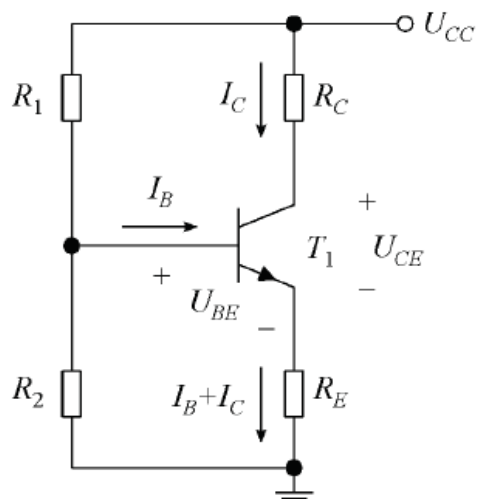


A) STATIKA

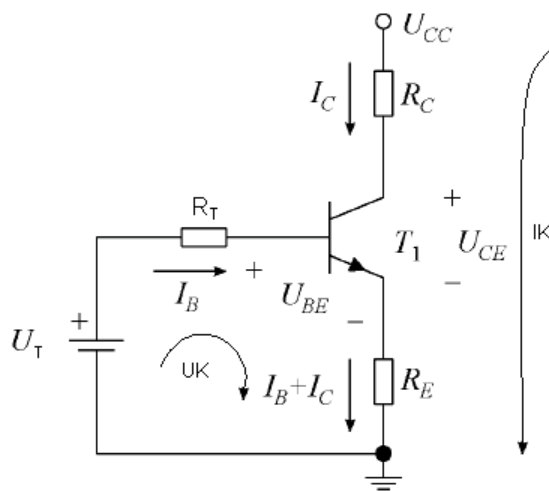
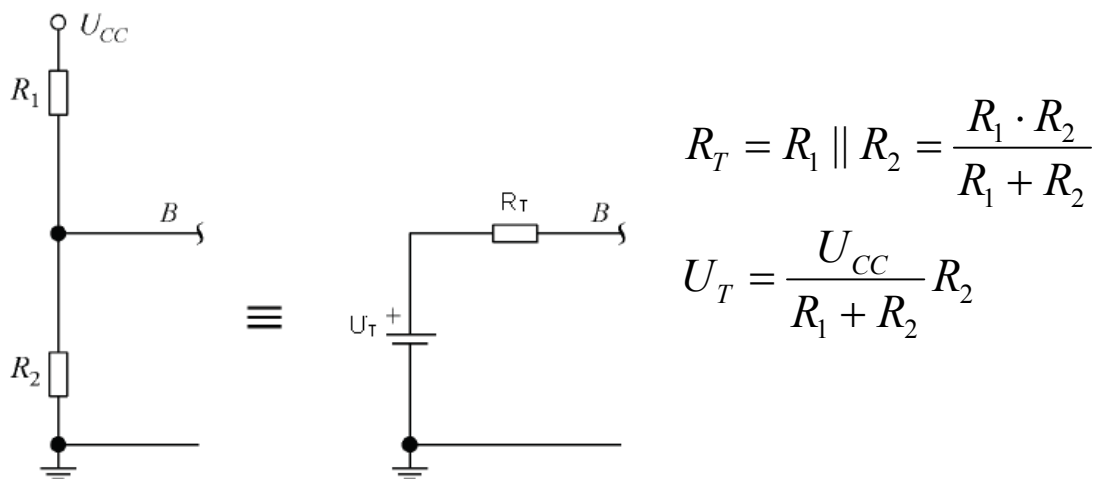
a) Analitičko određivanje SRT

Poznate veličine:  $h_{fe}$ ,  $U_{cc}$ ,  $U_{BE} = \text{konst.}$

Kod statike kondenzator predstavlja prekid strujnog kruga pa time naša shema izgleda ovako.



Kako bismo riješili ovo naponsko djelilo ( $R_1$ ,  $R_2$ ) koristimo Theveninov teorem



Ulazni krug :

$$(KZN) \quad U_T = R_T I_B + U_{BE} + R_E (I_B + I_C)$$

Izlazni krug:

$$(KZN) \quad U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C - R_E (I_B + I_C)$$

Za SRT

$$I_E = (1 + h_{fe})I_B$$

$$U_T = R_T I_{BQ} + U_{BEQ} + R_E (1 + \beta) I_{BQ}$$

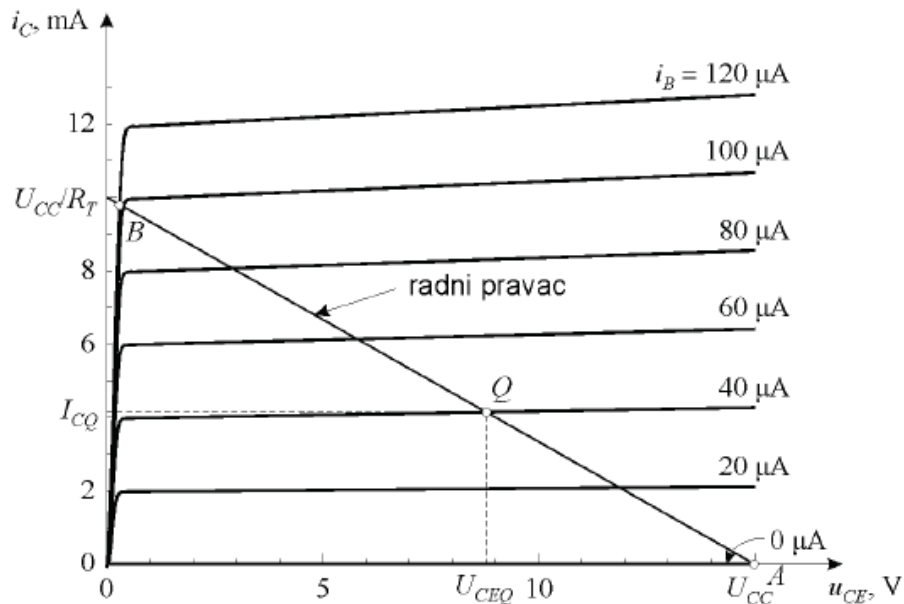
$$I_{BQ} = \frac{U_T - U_{BEQ}}{R_T + R_E (1 + \beta)}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

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

### b) Grafičko određivanje SRT

Poznate veličine: svi otpornici, napon napajanja, napon baza-emiter je konst.



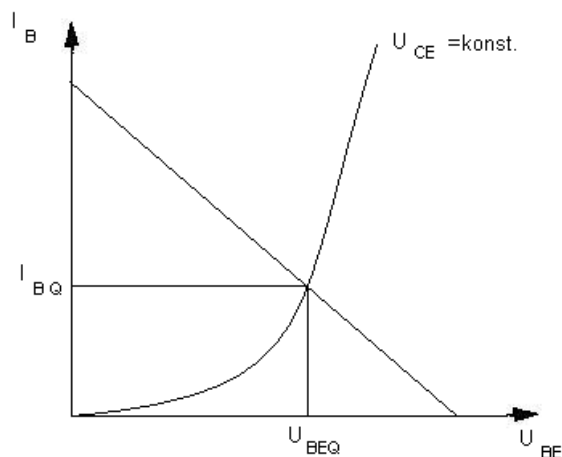
Iz jednadžbe

$$U_{CC} = I_C R_C + U_{CE}$$

Za prvu točku uzmemo da je  $I_C = 0$  tada dobijemo napon kolektor-emiter  $U_{CE}$  ( $U_{CE} = U_{CC}$ )

Za drugu točku uzmemo da je  $U_{CE} = 0$  tad dobijemo struju kolektora  $I_C$  ( $I_C = U_{CC} / R_C$ )

Za dobivanje struje  $I_B$  uzimamo ulaznu karakteristiku



$$I_{BQ} = \frac{U_T - U_{BE}}{R_T}$$

## B) Dinamika

Svojstva pojačala u spoju zajedničkog emitera pod pretpostavkom da se radi o pojačanju signala relativno niskih frekvencija možemo prikazati pomoću hibridnih parametara:

$$h_{ie} = \left. \frac{u_{be}}{i_b} \right|_{u_{ce}=0} \quad \text{ulazni otpor uz kratko spojeni izlaz}$$

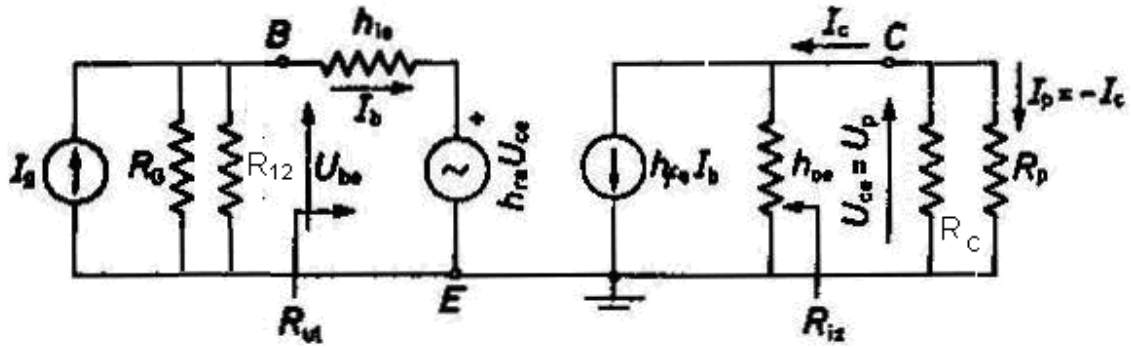
$$h_{re} = \left. \frac{u_{be}}{u_{ce}} \right|_{i_b=0} \quad \text{faktor naponskog povratnog djelovanja uz otvoreni ulaz}$$

$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{u_{ce}=0} \quad \text{faktor strujnog pojačanja uz kratko spojen izlaz}$$

$$h_{oe} = \left. \frac{i_c}{u_{ce}} \right|_{i_b=0} \quad \text{izlazna vodljivost uz otvoren ulaz}$$

Hibridni parametri nisu konstantne veličine za zadani tranzistor već ovise o položaju statičke radne točke temperaturi i frekvenciji.

$$\begin{aligned} u_{be} &= h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce} \\ i_c &= h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce} \end{aligned}$$



Kako bismo jednostavnije prikazali dinamička svojstva naponski izvor  $u_g$  pretvorili smo u strujni.

Strujno pojačanje :

$$A_I = \frac{i_p}{i_b} = -\frac{i_c}{i_b} = -\frac{h_{fe}}{1 + h_{oe}R_p} \quad A_I = 20\log \frac{I_{iz}}{I_{ul}}$$

Naponsko pojačanje :

$$A_V = \frac{U_p}{U_{be}} = A_I \frac{R_p}{R_{ul}} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}\left(h_{oe} + \frac{1}{R_p}\right) - h_{re}h_{ie}} \quad A_V = 20\log \frac{U_{iz}}{U_{ul}}$$

Izlazni otpor :

Definicija: Ugasimo izvor  $U_g$ . Izlazni otpor je definiran kao omjer napona priključenog na stezaljke prethodno odspojenog otpora  $R_p$  i struje koju taj naponski izvor tjera.

$$R_{iz} = \frac{U_{ce}}{I_c} = \frac{1}{h_{oe} - \frac{h_{re}h_{fe}}{R_G + h_{ie}}}$$

Ulazni otpor :

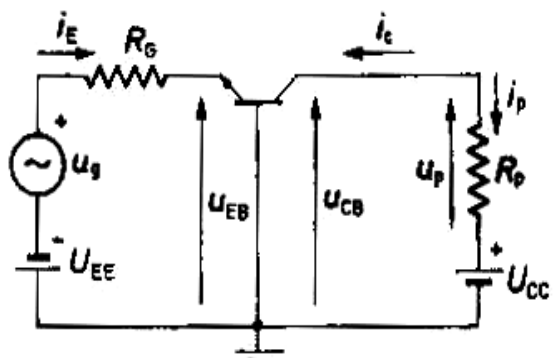
$$R_{ul} = \frac{U_{be}}{I_b} = h_{ie} + h_{re} + A_I R_p = h_{ie} - \frac{h_{re}h_{ie}}{h_{oe} + \frac{1}{R_p}}$$

$$R_{ul}' = R_{12} \parallel R_{ul}$$

$$R_{iz}' = R_c \parallel R_{iz}$$



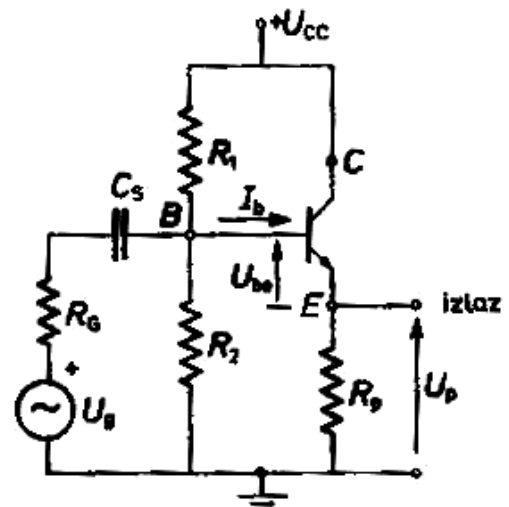
### Pojačalo u spoju zajedničke baze



$$i_E = i_e + I_{EQ}; \quad i_C = i_c + I_{CQ}; \quad i_p = -i_c;$$

$$u_{EB} = u_{eb} + U_{EBQ}; \quad u_{CB} = u_{cb} + U_{CBQ}$$

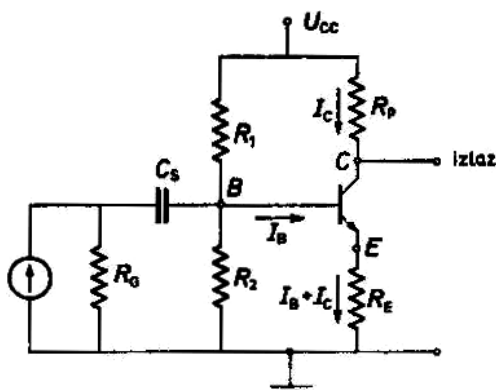
### Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora



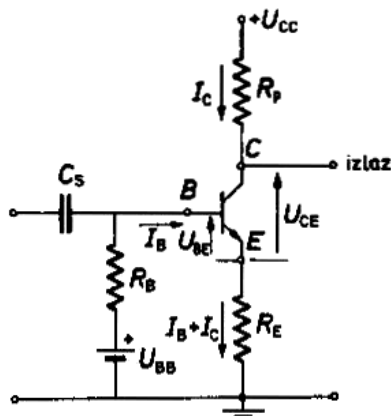
Postupak određivanja statičkih i dinamičkih karakteristika potpuno je identičan onome kod pojačala u spoju zajedničkog emitera.

## 10. Emitterska degeneracija

Za veću stabilnost statičke radne točke tranzistora a time i stabilnost karakteristika pojačala, može se postići ako u sklopu na slici 1. u krug emitera ubaci otpor  $R_E$ , a otpor  $R_B$  zamjeni djelilom  $R_1$ - $R_2$  prema slici 1. Stabilizirajuće djelovanje otpora  $R_E$  možemo objasniti na sljedeći način. Pretpostaviti ćemo da je ulazni signal jednak nuli ( $i_g=0$ ), te u sklopu postoje samo istosmjerne komponente napona i struja. Ako se istosmjerna struja kolektora  $I_C$  iz bilo kojih razloga poveća (npr. Zbog povećanja temperature), porast će struja kroz  $R_E$  jer je ta struja suma struje  $I_C$  i struje  $I_B$ . Veća struja kroz  $R_E$  zanči i veći pad napona na tom otporniku, te istosmjerni potencijal emitera raste. Time se smanjuje napon propusne polarizacije spoja emiter- baza  $U_{BE}$ , te struja baze  $I_B$  otpada. Budući da struja kolektora proporcijalna struji baze, dolazi do ograničenja porasta struje kolektora i ona će rasti manje nego u slučaju kada je  $R_E=0$ . Sklop na slici 1 može se pojednostaviti ako se djelovanje napona  $U_{CC}$  i djelitelja  $R_1$ - $R_2$  u ulaznom krugu nadomjestiti prema slici 2. Theveninovim izvorom elektromotorne sile  $U_T$  i unutrašnjeg otpora  $R_B$  :



Slika 1.



Slika 2.

$$A_I = \frac{I_p}{I_{ul}} = \frac{I_p}{I_b} \cdot \frac{I_b}{I_{ul}} = \frac{-h_{fe} \cdot I_b}{I_b} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_{ul}} = -h_{fe} \frac{R_B}{R_B + h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E}$$

Strujno pojačanje u prisustvu otpora  $R_E$  u krugu emitera manje je nego kada je  $R_E = 0$ . Otpor  $R_E$  svojim prisustvom ruši iznos strujnog pojačanja jer povećava ulazni otpor tranzistora pa prisiljava struju  $I_{ul}$  da umjesto u bazu tranzistora teče kroz otpor  $R_E$ . To bi se moglo izbjeći kada bi se ispuni o uvjet  $R_B \gg (1+h_{fe})R_E$ . Ovu relaciju možemo i ovako napisati:

$$R_B \gg (1 + h_{fe})R_E \approx (1 + \beta)R_E$$

Uvjet osigurava očuvanje iznosa strujnog pojačanja i kada je prisutan  $R_E$ . Taj uvjet je suprotan uvjetu  $(1+\beta)R_E \gg R_B$  koji osigurava stabilan položaj statičke radne točke.

Naponsko pojačanje iznosi:

$$A_V = \frac{U_p}{U_{ul}} = \frac{I_p R_p}{I_b R_{ul}} = \frac{-h_{fe} \cdot I_b R_p}{I_b R_{ul}} = -\frac{h_{fe} \cdot R_p}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E}$$

Otpor  $R_E$  smanjuje i naponsko pojačanje sklopa. Za razliku od strujnog pojačanja koje se također smanjuje u prisustvu otpora  $R_E$  naponsko se pojačanje smanjuje neovisno o prisustvu otpora  $R_E$ , to se spriječava postavljanjem kondenzatora u paralelu s otpornikom  $R_E$  tada otpornik ne utječe na naponsko pojačanje..

Izlazni otpor ovdje je zbog zanemarenja hibridnih parametara  $h_{oe}$  i  $h_{re}$  beskonačno velik kao i u sklopu na slici 1.

Otpor  $R_E$  u krugu emitera pridonosi stabilnosti statičke radne točke tranzistora, uz istodobni porast ulaznog otpora i pada strujnog i naponskog pojačanja. Smanjenje iznosa naponskog i strujnog pojačanja. Smanjenje iznosa naponskog i strujnog pojačanja obično se označava kao **degeneracija** ali u ovom slučaju izazvano otporom u krugu emitera zove se **emitorska degeneracija**. Iako degeneracija smanjuje iznose pojačanja ono pozitivno djeluje ne samo na stabilnost statičke radne točke već ina stabilnost naponskog pojačanja.

$$A_V \approx -\frac{R_P}{R_E}$$

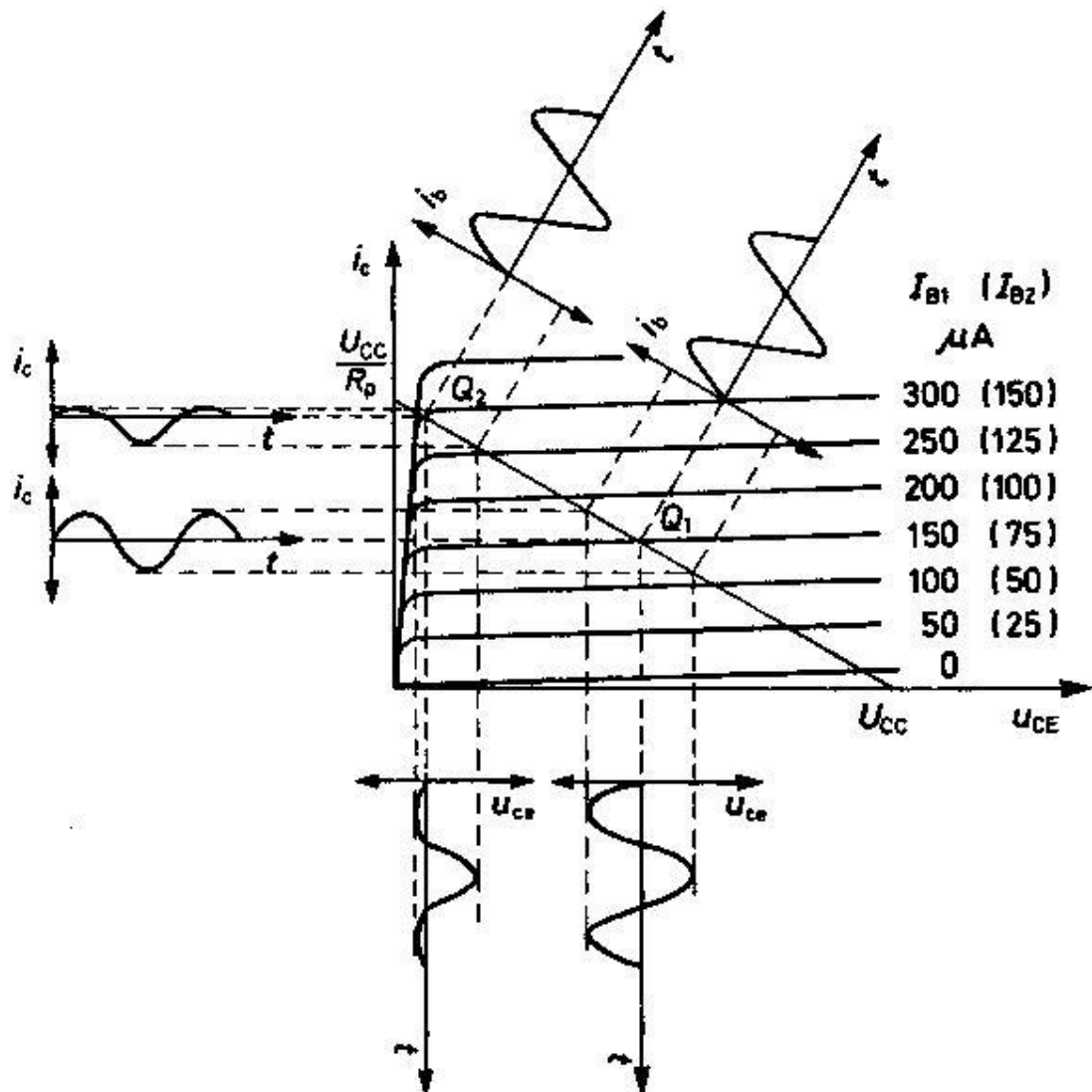
Ulazni otpor tranzistora : 
$$R_{ul} = \frac{U_b}{I_b} = h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E$$

Relacija pokazuje da prisustvo otpora  $R_E$  u krugu emitera dovodi do značajnog povećanja ulaznog otpora tranzistora u odnosu na slučaj kada je  $R_E = 0$ . Ulazni otpor sklopa  $R_{ul}'$  mora uključivati i otpor  $R_B$ . Taj otpor iznosi

$$R_{ul}' = \frac{R_B \cdot R_{ul}}{R_B + R_{ul}}$$

U prisustvu emitorske degeneracije može se osigurati uz smanjenje apsolutnog iznosa naponskog pojačanja, njegov vrlo stabilan iznos praktički neovisan o svim parametrima tranzistora.

## 11. Odabir položaja statičke radne točke BT



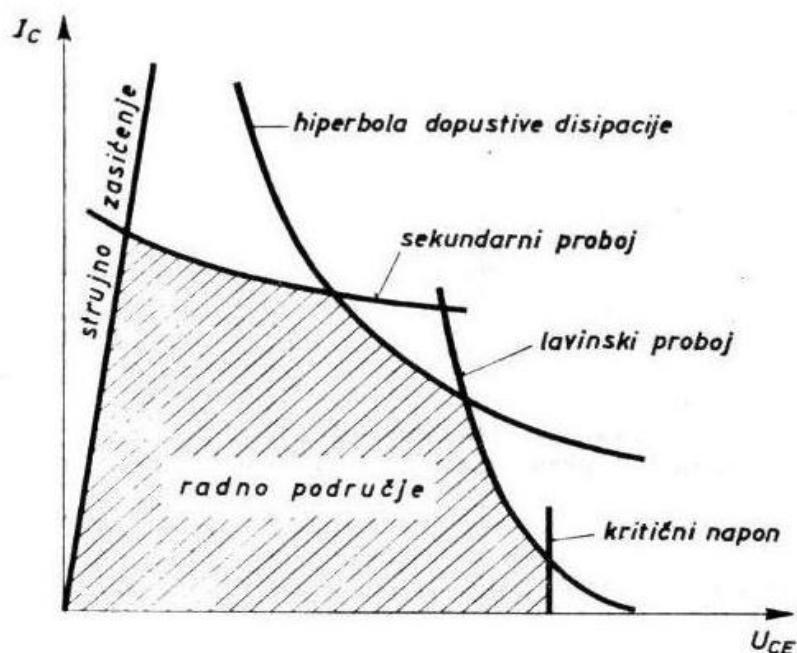
Ako tranzistor ima radnu točku u položaju  $Q_2$  zbog rasipanja iznosa faktora  $\beta$  on neće biti pouzdan jer će onda postojati i rasipanje istosmjerne struje kolektora a time i naponskog i strujnog pojačanja te ulaznog i izlaznog otpora sklopa. Do pomicanja može doći i zbog temperaturne ovisnosti, jer pri porastu temperature dolazi do smanjenja rekombinacije u bazi tranzistora što povećava faktor  $\beta$ . Tada statička radna točka počinje putovati prema zasićenju tj. točki  $Q_2$  gdje taj pomak opet izaziva rasipanje iznosa faktora  $\beta$ . Položaj statičke radne točke najidealniji je kada se nalazi na sredini statičkog radnog pravca, položaj  $Q_1$ .

Da bi sklop bio stabilan i što otporniji na temperaturne promjene potrebno je izvršiti stabilizaciju statičke radne točke. To postizemo najčešće pomoću emitterske degeneracije ili kompezacijske tehnike.

## 12. Ograničenja u radu tranzistora

Kako bi se tranzistor osigurao od pregrijavanja i uništenja i da bi se spriječilo izobličenje signala treba izmjenične i istosmjerne napone i struje u kolektorskom krugu držati u određenim granicama. Ta ograničenja definirana su u 5 točaka. To su :

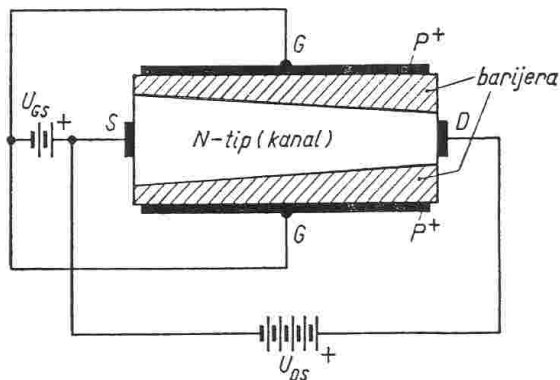
1. Linija struje zasićenja
2. Linija sekundarnog proboja
3. Hiperbola najveće dopuštene disipacije
4. Linija lavinskog proboja
5. Napon kritične vrijednosti



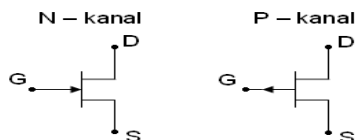
1. **Linija struje zasićenja**- kod napona od nekoliko destaka volta kolektorska struja naglo raste. Pri daljnjem povećanju kolektorskog napona porast struje se zaustavlja, praktički nastupa zasićenje.
2. **Linija sekundarnog proboja** – kod nekih tranzistora spojište baza – kolektor ima veću površinu pa je otežano odvođenje topline od sredine spojišta. Zbog velike struje u spojištu nastaju i vruće točke. Uz dovoljno veliku temperaturu na vrućim točkama može doći do taljenja baze te se ona kratko spoji i time uništi tranzistor.
3. **Hiperbola najveće dopuštene disipacije** – u praksi se uzima da je to energija koja se oslobodi na emitorskom otporu tj. gubitak snage na emiteru ( $P_d = U_{CE} \cdot I_C$ ). Bitno je da produkt struje i napona ne pređu dopuštenu vrijednost.
4. **Linija lavinskog proboja** – pri naponima iznad te krivulje struja kolektora počinje naglo rasti. Zbog pojačane struje tranzistor se počinje jako zagrijavati, povećana temperatura još pojačava struju koja onda raste lavinski i nastaje uništenje tranzistora.
5. **Napon kritične vrijednosti** – kolektorska struja ovisi o faktoru strujnog pojačanja, o prednaponu i o preostaloj struji. S porastom temperature ti se faktori mijenjaju tako da se kolektorska struja povećava. Ako se kolektoru privede napon granične vrijednosti ugrijavanje se povećava i anstaje temperaturni bijeg sve do uništenja tranzistora.

### 13. FET i MOSFET izvedba i vrste

FET – tranzistor koji se upravlja vanjskim naponom



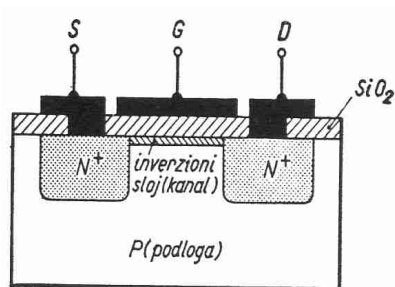
Sl. 15.2. Prikaz spojnog FET-a s izvorima napajanja.



$U_{GS}$  – zaporno polariziran

Struja prolazi sredinom poluvodiča (kanala), manje je osjetljiv na vanjske utjecaje (prašine). Kod NFET-a kanal je širi u blizini S elektrode zbog manjeg onečišćenja (peterovalentnim atomima), dok prema D elektrodi kanal se sužava zbog većeg onečišćenja. Povećanjem napona  $U_{GS}$  povećavamo širinu kanala čime se povećava i struja  $I_D$ .

MOSFET (metal-oksidi)



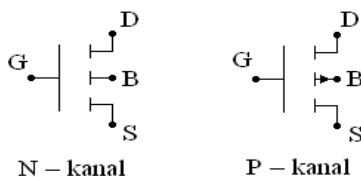
5.3. Osnovna konfiguracija MOSFET-a sa N-kanalom.

- osiromašeni i obogaćeni tip podloge
- osiromašeni i obogaćeni režim rada (inverzni sloj)
- P-tip, ne koristi se osiromašeni (samo obogaćeni)
- dok je napon jednak 0, neka struja  $I_D$  ipak prolazi kroz kanal zato što se inverzioni sloj sam formira između  $SiO_2$  i P (podloge)

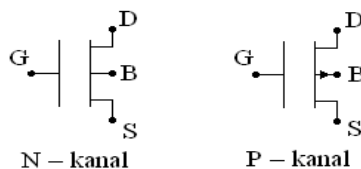
Struja prolazi kroz površinu poluvodiča, i stoga je više osjetljiv na vanjske utjecaje (prašina).

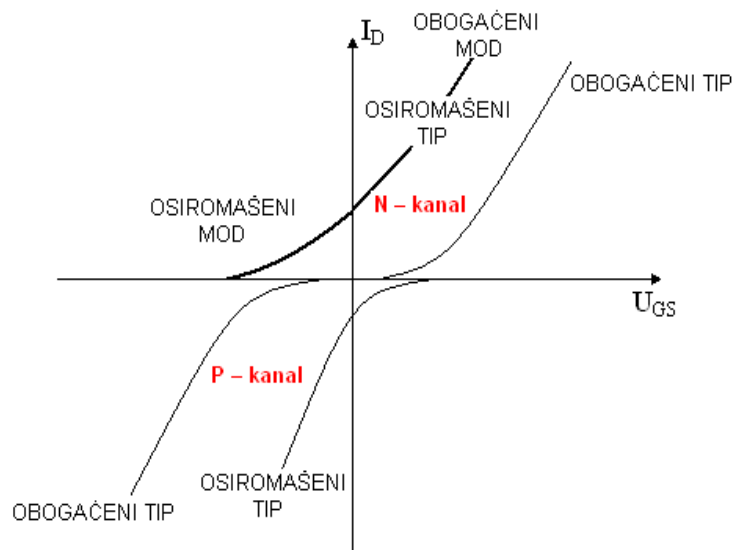
Inverzioni sloj se povećava pozitivnim naponom  $U_{GS}$ , kanal se širi, čija je posljedica povećanje struje  $I_D$ .

#### OBOGAĆENI



#### OSIROMAŠENI

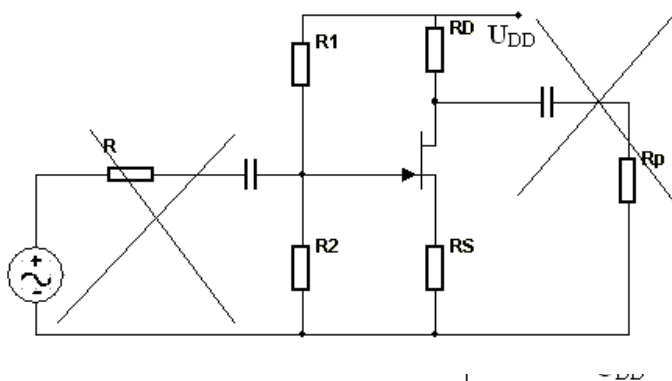




#### 14. Pojačalo sa FET u spoju zajedničkog uvoda (source-a) dinamika i statika

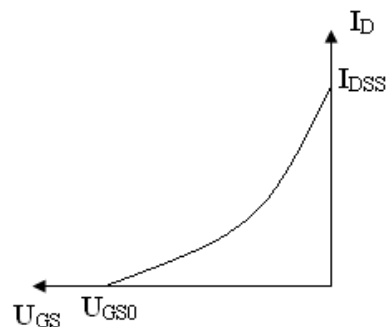
JFET

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2$$



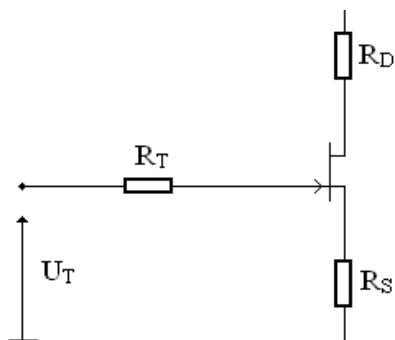
$$U_T = I_D \cdot R_T$$

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2$$



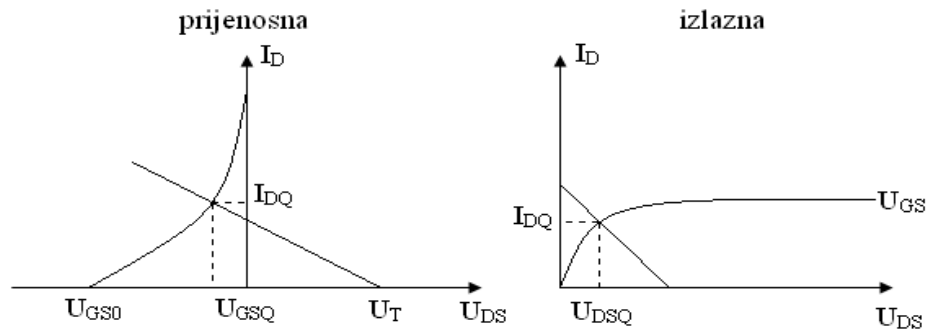
Za  $U_{GS}$  dobivamo dvije vrijednosti zbog kvadratne jednadžbe, a uzmemo vrijednost između  $U_{GS0}$  i  $U_{GS}=0V$ .

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



## ANALITIČKO-GRAFIČKI

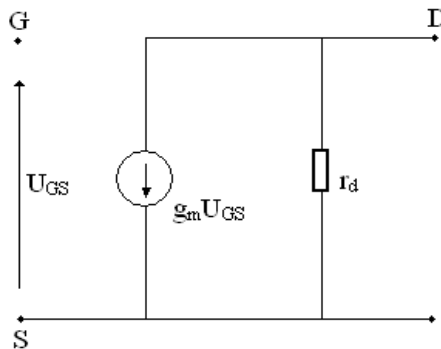
$$U_T = U_{GS} + I_D \cdot R_S$$



Dinamika:

- sve kondenzatore kratko spojiti
- istosmjerni izvor spojimo na masu

Nadomjesni (strujni) model

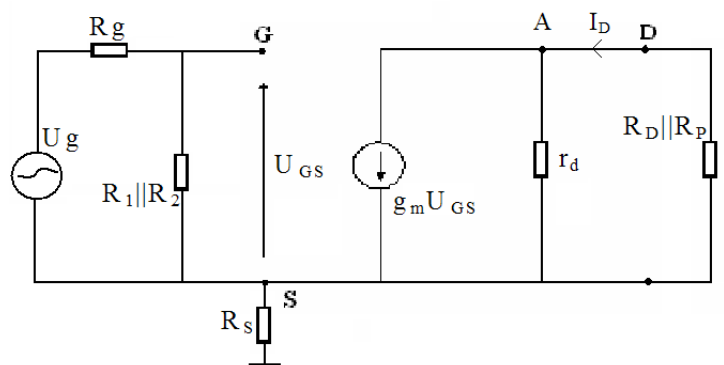


$$g_d = \frac{1}{r_d}$$

$$r_d = r_{iz}$$

$$I_D = g_m U_{GS} - \frac{I_D \cdot R_P}{r_d} \rightarrow U_{GS} = \frac{\pm I_D \left(1 + \frac{R_P}{r_d}\right)}{g_m}$$

$$A_v = \frac{U_P}{U_{GS}} = \frac{-I_D \cdot R_P}{\frac{I_D (1 + R_P)}{g_m}} = \frac{-g_m \cdot r_d}{1 + g_d \cdot R_P}$$

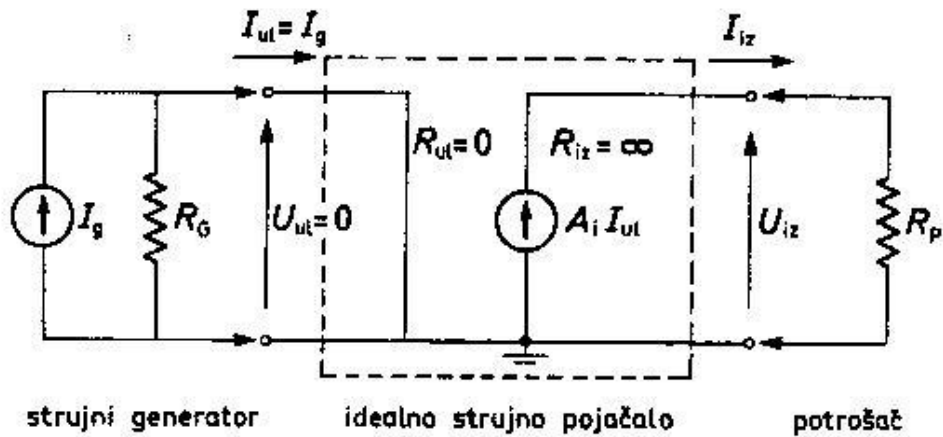




## 15. Vrste pojačala i njihove karakteristike – strujno, naponsko, otporno, strminsko

### Strujno pojačalo

*Idealno strujno pojačalo*



Izlazni otpor je beskonačan ( $R_{iz} = \infty$ )

Ulazni otpor je nula ( $R_{ul} = 0$ )

Ulazna struja jednaka je struji generatora ( $I_{ul} = I_g$ )

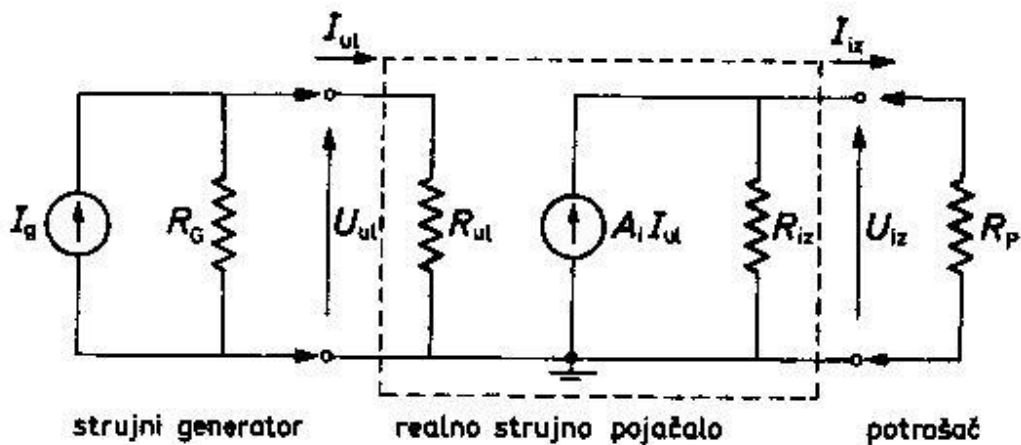
Ulazni napon jednak je nuli ( $U_{ul} = 0$ )

$$I_{iz} = A_i I_{ul} = A_i I_g \neq f(R_P)$$

$$U_{iz} = I_{iz} R_P = A_i I_g R_P = f(R_P)$$

Potrošač svojom impedancijom nema nikakvo povratno djelovanje na generator signala na ulazu pojačala, generator na ulazu u potpunosti izoliran od potrošača na izlazu.

### Realno strujno pojačalo



Realno strujno pojačalo ima konačni ulazni otpor  $R_{ul}$  i konačni izlazni otpor  $R_{iz}$ . Struja  $I_g$  koju daje generator signala na ulazu ne teče više kompletna u pojačalo već se djeli na dvije komponente od kojih jedna teče kroz  $R_G$  a druga kroz  $R_{ul}$ .

Ulazna struja realnog pojačala:

$$I_{ul} = I_g \frac{R_G}{R_G + R_{ul}} < I_g$$

Izlazna struja realnog pojačala:

$$I_{iz} = A_i \frac{R_{iz}}{R_{iz} + R_P} I_{ul} = f(R_P)$$

Strujno pojačanje:

$$A_I = \frac{I_{iz}}{I_{ul}} = A_i \frac{R_{iz}}{R_{iz} + R_P} = f(R_P)$$

Naponsko pojačanje:

$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = A_i \frac{R_P}{R_{ul}}$$

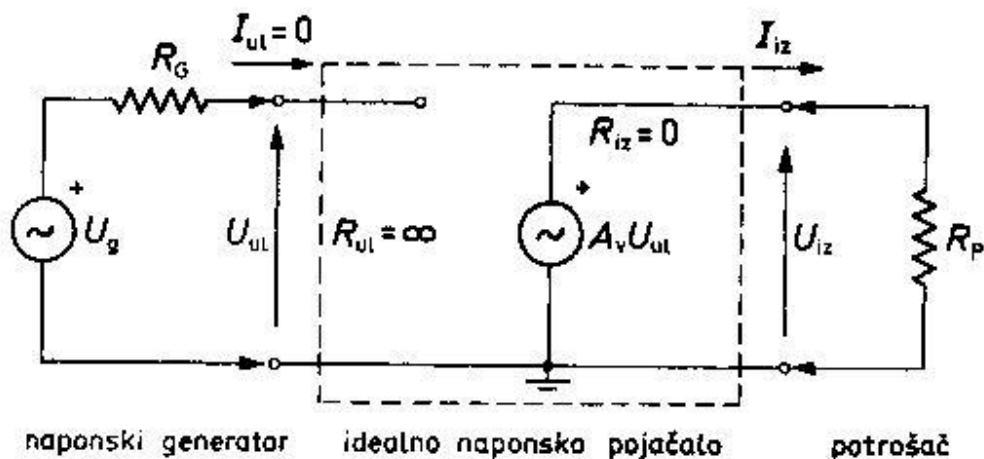
Pojačanje snage:

$$G = A_i A_V$$

Dobro strujno pojačalo je kada je u ulaznom krugu osiguran uvjet  $R_{ul} \ll R_G$  a u izlaznom krugu  $R_{iz} \gg R_P$ .

## Naponsko pojačalo

*Idealno naponsko pojačalo*



$$U_{iz} = A_V U_{ul} = A_V U_g \neq f(R_P)$$

Parametri :

Ulazni otpor je beskonačan ( $R_{ul} = \infty$ )

Izlazni otpor je nula ( $R_{iz} = 0$ )

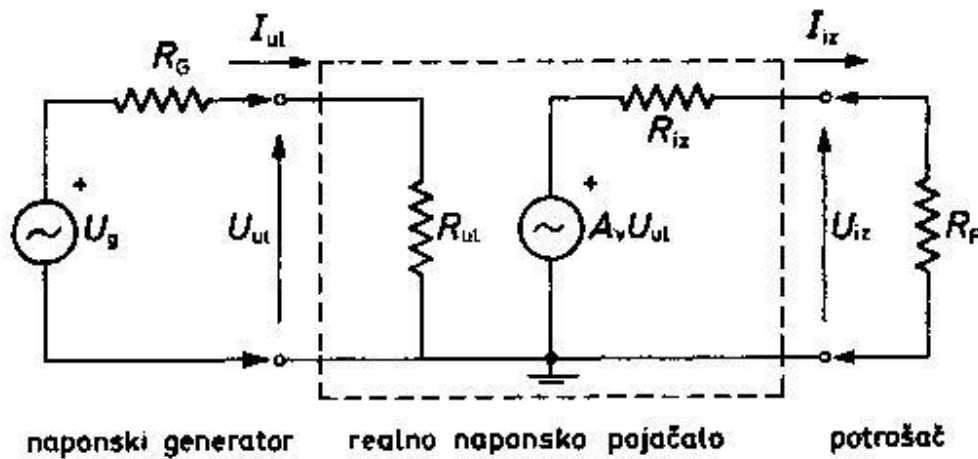
Ulazna struja je nula ( $I_{ul} = 0$ )

Ulazni napon jednak je naponu generatora ( $U_{ul} = U_g$ )

Izlazna struja:

$$I_{iz} = \frac{U_{iz}}{R_P} = \frac{A_V U_{ul}}{R_P} = f(R_P)$$

**Realno naponsko pojačalo**



Za razliku od idealnog naponskog pojačala realno naponsko pojačalo ima ulazni otpor  $R_{ul}$  a umjesto idealnog naponskog izvora u izlaznom krugu realni naponski izvor s konačnim izlaznim otporom  $R_{iz}$ . U tom slučaju na ulazne stezaljke pojačala dolazi napon  $U_{ul}$  manji od napona  $U_g$  ulaznog generatora:

$$U_{ul} = U_g \frac{R_{ul}}{R_G + R_{ul}} < U_g$$

Izlazni napon:

$$U_{iz} = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = A_V \frac{R_P}{R_{iz} + R_P} U_{ul} = f(R_P)$$

Naponsko pojačanje:

$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = A_V \frac{R_P}{R_{iz} + R_P} = f(R_P)$$

Dobro naponsko pojačalo je ono koje ispunjava uvjete  $R_{ul} \gg R_G$  i  $R_{iz} \ll R_P$

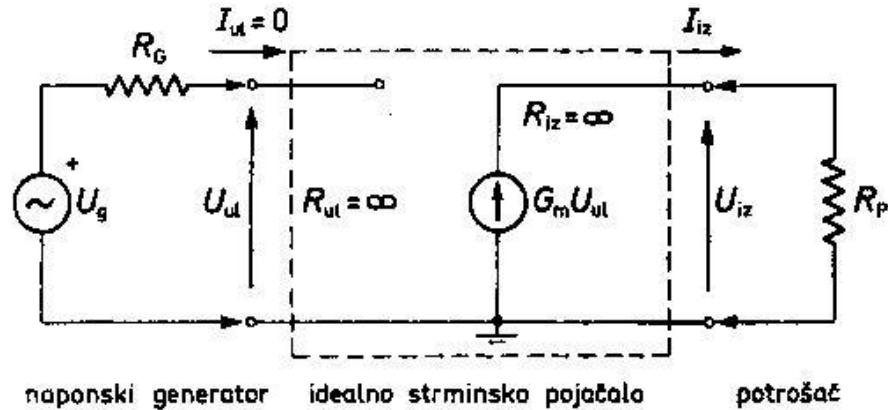
$$A_I = \frac{I_{iz}}{I_{ul}} = A_V \frac{R_{ul}}{R_P}$$

Pojačanje snage realnog naponskog pojačala:

$$G = A_V A_I$$

## Strmisko pojačalo

### Idealno strmisko pojačalo



Ova vrsta pojačala zove se strmisko pojačalo jer promjena ulaznog napona izaziva promjenu izlazne struje i ulaznog napona. Faktor proporcionalnosti  $G_m$  je strmina pojačala, izražava se omjerom struje i napona, najčešće mA/V. Kod idealnog strmiskog pojačala ta veličina je konstanta neovisna o otporu potrošača i frekvenciji signala.

Ulazni otpor je beskonačan ( $R_{ul} = \infty$ )

Izlazni otpor je beskonačan ( $R_{iz} = \infty$ )

Ulazna struja je nula ( $I_{ul} = 0$ )

Ulazni napon jednak je naponu generatora ( $U_{ul} = U_g$ )

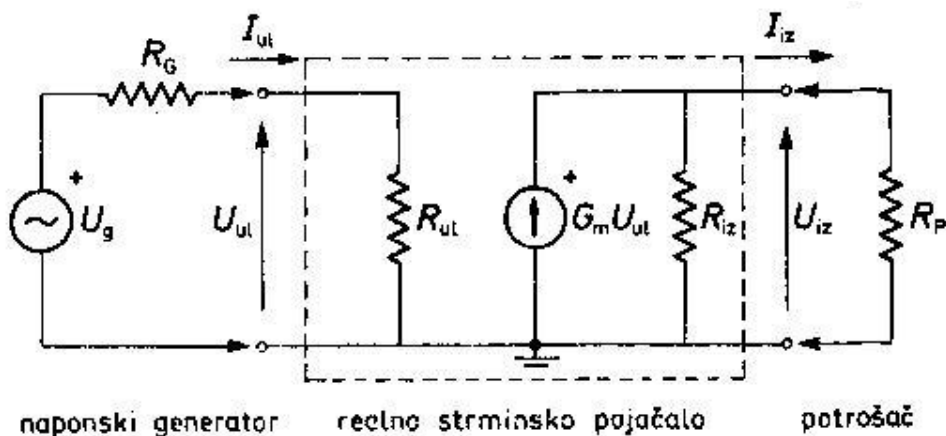
Izlazna struja:

$$I_{iz} = G_m U_{ul} = G_m U_g \neq f(R_P)$$

Izlazni napon:

$$U_{iz} = I_{iz} R_P = G_m U_{ul} R_P = f(R_P)$$

### Realno strmisko pojačalo



Za razliku od idealnog strmiskog pojačala ima konačan ulazni i izlazni otpor. Iz ulaznog kruga slijedi:

$$U_{ul} = U_g \frac{R_{ul}}{R_{ul} + R_G} < U_g$$

Iz izlaznog slijedi:

$$I_{ul} = G_m \frac{R_{iz}}{R_{iz} + R_p} U_{ul} = f(R_p)$$

Strmina realnog strminskog pojačala je omjer izlazne struje i ulaznog napona:

$$G_M = \frac{I_{iz}}{U_{ul}} = G_m \frac{R_{iz}}{R_{iz} + R_p} = f(R_p)$$

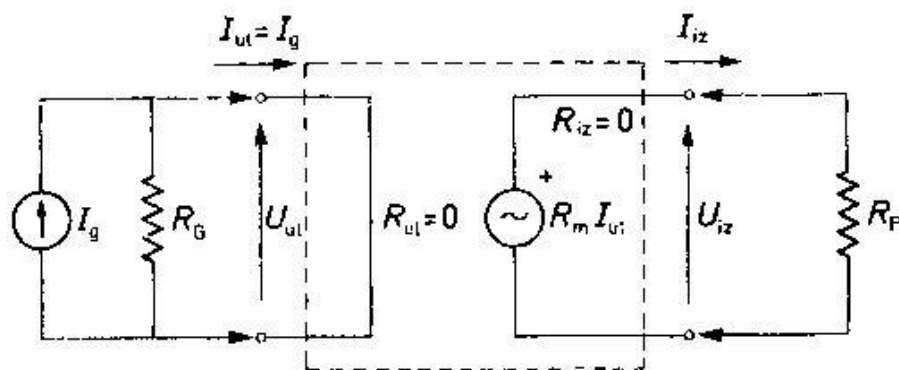
Dobro strminsko pojačalo je ako u što većoj mjeri ispunjava uvjete da je  $R_{ul} \gg R_G$  i  $R_{iz} \gg R_p$

Naponsko pojačanje realnog strminskog pojačala je:

$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = G_M R_p$$

### Otporno pojačalo

*Idealno otporno pojačalo*



Ulazni otpor je beskonačan ( $R_{ul} = \infty$ )

Izlazni otpor je nula ( $R_{iz} = 0$ )

Ulazna struja je jednaka je struji generatora ( $I_{ul} = I_g$ )

Ulazni napon jednak je nuli ( $U_{ul} = 0$ )

$$U_{iz} = I_{ul} R_m = R_m I_g \neq f(R_p)$$

Faktor proporcionalnosti  $R_m$  je prijenosni omjer. Kod idealnog pojačala ta veličina je konstantna neovisna o otporu priključenog potrošača i frekvenciji signala.

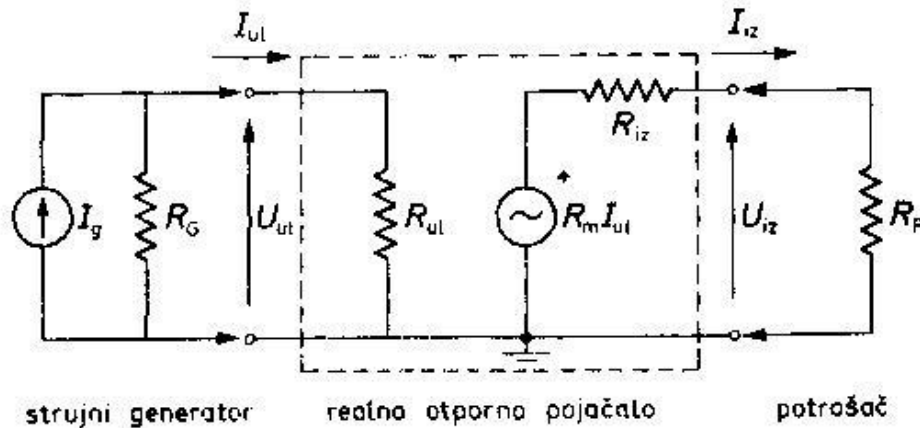
Izlazna struja:

$$I_{iz} = \frac{U_{iz}}{R_p} = \frac{R_m}{R_p} I_{ul}$$

Strujno pojačanje:

$$A_i = \frac{I_{iz}}{I_{ul}} = \frac{R_m}{R_p} = f(R_p)$$

## Realno otporno pojačalo



Za razliku od idealnog realno otporno pojačalo ima konačan ulazni i izlazni otpor. Zbog toga ulazna struja pojačala manja je nego kod idealnog pojačala.

$$I_{ul} = I_g \frac{R_G}{R_{ul} + R_G} < I_g$$

Konačni izlazni otpor smanjuje i naponsko pojačanje:

$$U_{iz} = R_m \frac{R_P}{R_{iz} + R_P} I_{ul} = f(R_P)$$

Prijenosni otpor:

$$R_M = \frac{U_{iz}}{I_{ul}} = R_m \frac{R_P}{R_{iz} + R_P} = f(R_P)$$

Realno otporno pojačalo je dobro ako u što boljoj mjeri ispunjava uvjete  $R_{iz} \ll R_P$  i  $R_{ul} \ll R_G$ .

Izlazna struja predana potrošaču je:

$$I_{iz} = \frac{U_{iz}}{R_P} = \frac{R_M}{R_P} I_{ul}$$

Strujno pojačanje:

$$A_I = \frac{R_M}{R_P}$$

Naponsko pojačanje:

$$A_V = \frac{R_M}{R_{ul}}$$

## 16. Pojačala snage

Pojačalo snage ima zadaću predati trošilu što veću izmjeničnu snagu uz što manja izobličenja i što veći stupanj korisnog djelovanja (korisnost).

Korisnost je odnos izmjenične snage predane trošilu i ukupne snage privedene pojačalu.

$$\eta = \frac{P_P}{P_{CC}}$$

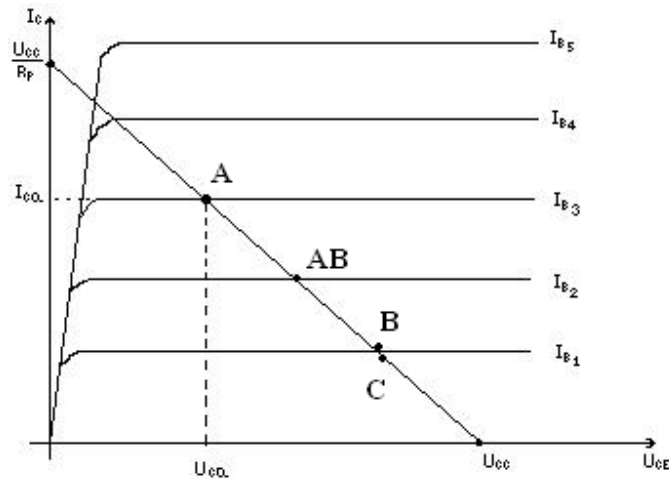
Gdje je  $P_P$  – snaga trošila

$P_{CC}$  – snaga izvora

Pojačala snage svrstavaju se u tri osnovne skupine koje se označavaju kao klasa A, klasa B i klasa C, ovisno o položaju statičke radne točke pojačivačkog elementa u polju izlaznih karakteristika.

Djelotvornost raste s klasom (od klase A pa nadalje).

Spuštanjem  $Q$  smanjujemo snagu koja se troši iz baterije (smanjujemo istosmjernu struju  $I_{CQ}$ ). Na taj način povećavamo korisnost pojačala dok se kao negativna posljedica javlja izobličenje signala.



Kod realnih pojačala umjesto strujnog izvora dolazi naponski. Razlika je u tome što kada naponskim izvorom pobuđujemo tranzistor imamo negativnu posljedicu da tranzistor ne vodi do napona većeg od napona praga ( $U_\gamma$ ). Problem ćemo riješiti dovođenjem dva prednapona.

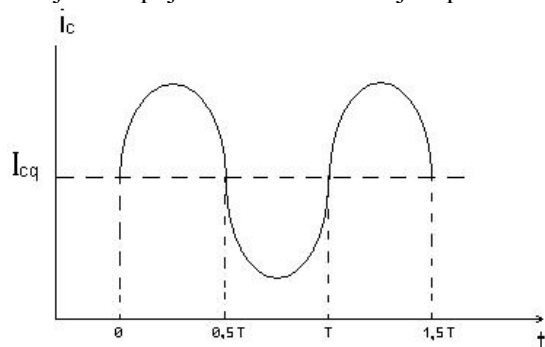
## 17. Pojačalo snage klase A

Klasa A karakterizirana je položajem statičke radne točke u normalnom aktivnom području, pri čemu ni u jednom trenutku pod djelovanjem signala radna točka ne smije dospjeti ni u područje zasićenja ni u zaporno područje.

Kada pojačalo radi u klasi A nelinearna izobličenja su najmanja, ali neovisno o postojanju signala kroz tranzistor uvijek teče istosmjerna struja.

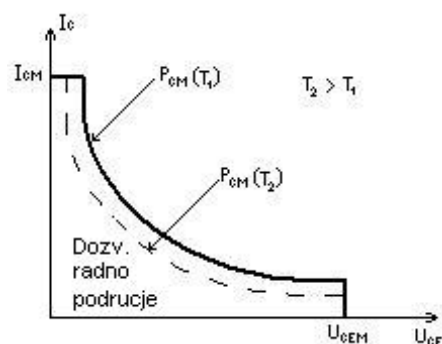
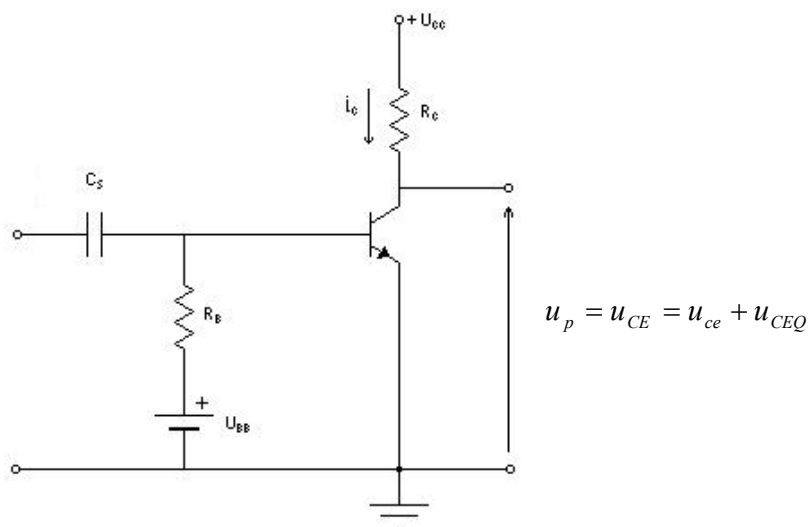
To izaziva trošenje snage istosmjernog izvora i disipaciju snage u tranzistoru i onda kada signal nije prisutan.

Struja kroz pojačalo teče tokom cijele periode.



Valni oblik struje kolektora pri radu pojacała u klasi A prikazan je pri sinusoidnoj pobudi u krugu baze.

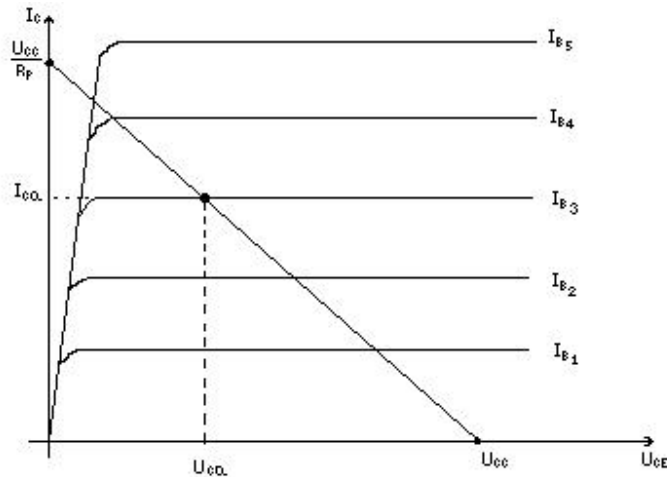
Pojačalo podešeno za rad u klasi A



Statička radna točka tranzistora mora ležati ispod hiperbole maksimalnih dozvoljenih kolektorskih gubitaka unutar područja kao na slici.  $I_{CM}$  je maksimalni dopušteni izvor struje,  $U_{CEM}$  je maksimalni dopušteni izvor napona kolektor-emiter,  $P_{CM}$  je maksimalni dopušteni iznos snage kolektorskih gubitaka. Veličina  $P_{CM}$  je snaga ograničena temperaturom spoja kolektor-baza. Disipiranjem snage na kolektorskom spoju povećava se temperatura tog spoja. Rast temperature dovodi do porasta struje kolektora. Pojava je

kumulativna i može dovesti do toplinskog bijega, odnosno do pregrijavanja i uništenja tranzistora, ako se izvedbom sklopa rast temperature ne ograniči.





Srednja snaga je  $P_{CC} = U_{CC} I_{CQ}$

Maksimalni dopušteni izvor struje je  $I_{cm} = \frac{I_{Cmax} - I_{Cmin}}{2}$

Maksimalni dopušteni izvor napona kolektor emiter je  $U_{cem} = \frac{U_{CEmax} - U_{CEmin}}{2}$

Iz ovoga slijedi da je maksimalna korisnost snage pojačala

$$\eta_{max} = \frac{(I_{Cmax} - I_{Cmin})(U_{CEmax} - U_{CEmin})}{8U_{CC}I_{CQ}}$$

Budući da je  $I_{Cmax} \gg I_{Cmin}$  i  $U_{CEmax} \gg U_{CEmin}$ , a  $I_{Cmax} \approx 2I_{CQ}$  i  $U_{CEmax} \approx U_{CC}$ , maksimalni  $\eta$  iznosi

$$\eta_{max} \approx \frac{I_{Cmax} U_{CEmax}}{8U_{CC}I_{CQ}} = \frac{2I_{CQ}U_{CC}}{8I_{CQ}U_{CC}} = 25\%$$

Korisnost može doseći i vrijednost i do 50% ako pojačalo od trošila odvojimo kapacitivnom ili induktivnom vezom.

Dobiveni rezultat pokazuje da pojačalo u klasi A ima nisku efikasnost, čak i u najpovoljnijem slučaju.

Jedan od parametara koji služe za ocjenu kvalitete pojačala snage je faktor kvalitete  $K_P$  definiran omjerom

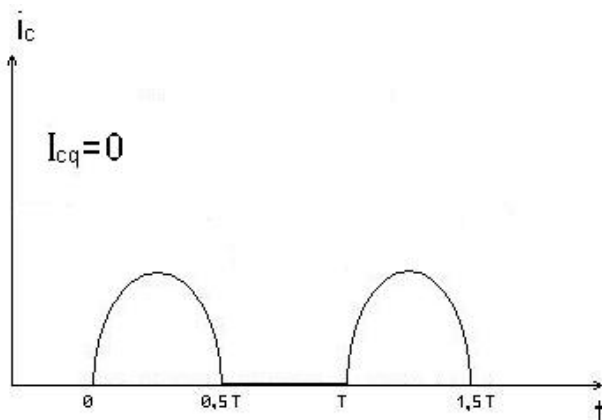
$$K_P = \frac{P_{Tmax}}{P_{Pmax}}$$

$P_{Tmax}$  – maksimalni iznos snage koja se troši u tranzistoru

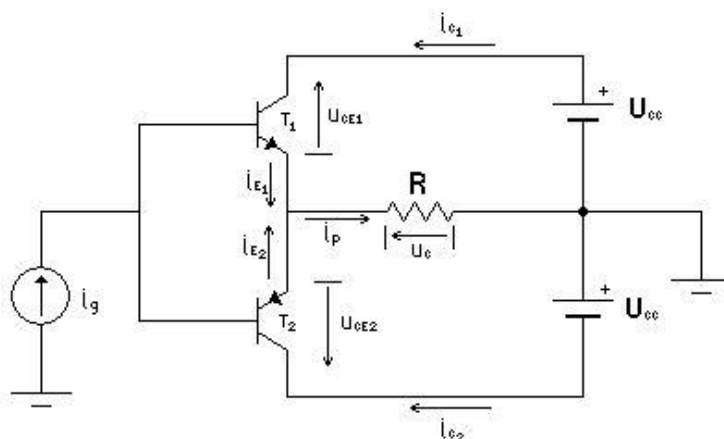
$P_{Pmax}$  – maksimalni iznos snage signala predanog potrošaču

## 18. Pojačalo snage klase B

U klasi B statička radna točka tranzistora leži na granici normalnoga aktivnog područja i područja zapiranja, tako da je istosmjerna struja kolektora u statičkoj radnoj točki  $I_{CQ}=0$ .



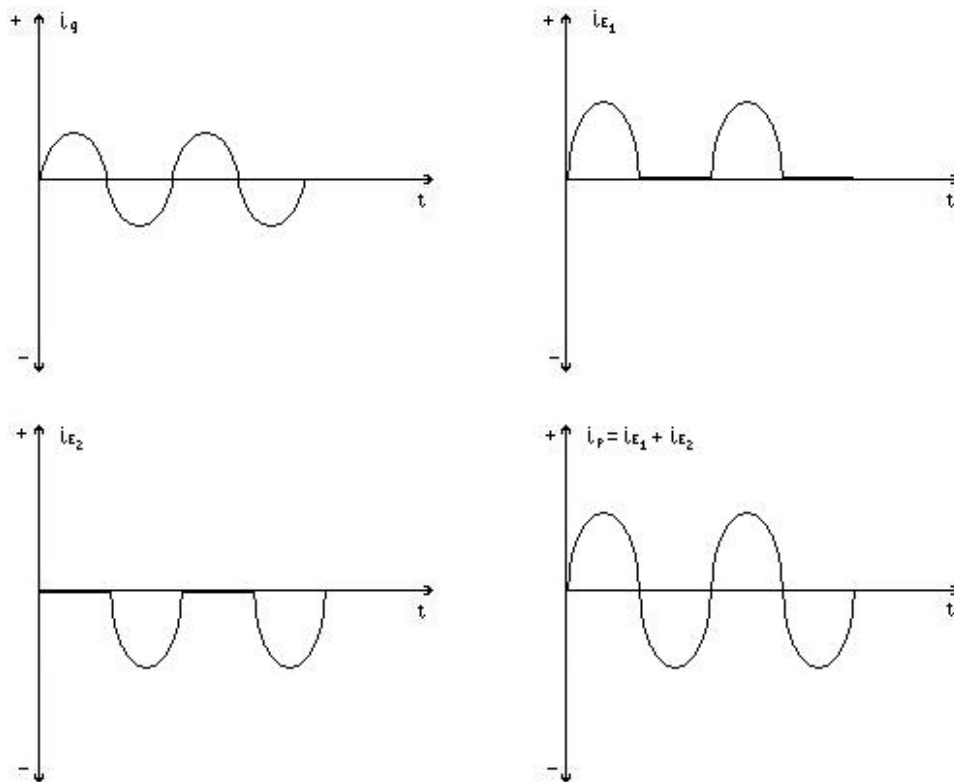
Struja kolektora pri sinusoidnom signalu na bazi tranzistora teče samo kroz polovinu svake periode. Pojačala snage u klasi B izvode se sa dva tranzistora u protutaktnom spoju, jer bi se u suprotnom pojavila velika nelinearna izobličenja. Svaki tranzistor prenosi jednu poluperiodu signala. Budući da je  $I_{CQ}=0$ , istosmjerni izvor nije opterećen kada nema signala na ulazu pojačala. Zbog toga je efikasnost pojačala klase B veća od efikasnosti klase A.



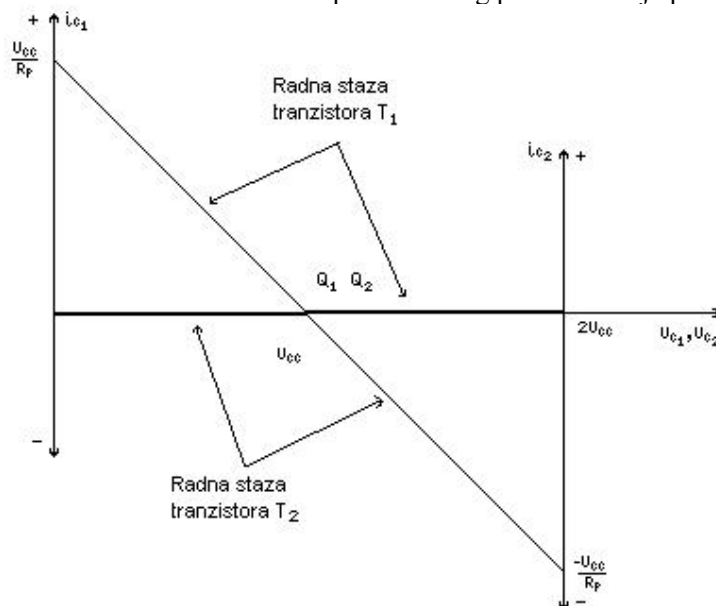
Ova izvedba sklopa se sastoji od dva tranzistora, jedan je PNP a drugi NPN. Da bi sklop dobro radio tranzistori moraju imati potpuno komplementarne karakteristike. Svaki tranzistor prenosi s istim pojačanjem jednu poluperiodu izmjeničnog signala, jer je  $I_{CQ}=0$  za oba tranzistora.

Ovakvo pojačalo zove se još i **protutaktno pojačalo** (engl. push-pull).

Pretpostavimo da strujni generator na ulazu pojačala daje izmjeničnu struju  $i_g$ . Tranzistor  $T_1$  je NPN tipa, pa su struje  $i_{E1}$  i  $i_{C1}$  ili pozitivne ili jednake nuli. Tranzistor  $T_2$  je PNP tipa, pa su struje  $i_{E2}$  i  $i_{C2}$  ili negativne ili jednake nuli. Kada je  $i_g > 0$ ,  $T_2$  je zatvoren, a  $T_1$  otvoren, pa cijela struja  $i_g$  teče u bazu tranzistora  $T_1$ . Obrnuto ako je  $i_g < 0$ , cijela struja teče u bazu tranzistora  $T_2$ , pri čemu je ta struja po predznaku negativna. Ako su tranzistori  $T_1$  i  $T_2$  potpuno komplementarni, obje poluperiode struje  $i_g$  se jednako pojačavaju i struja kroz potrošač  $i_p$  je pojačana verzija  $i_g$ . Valni oblici struja prikazani su na slici.



Statička radna točka tranzistora  $T_1$  je  $Q_1$ . Ta točka se nalazi u točki loma radne staze. Točka loma predstavlja granicu između normalnoga aktivnog područja i područja zapiranja. Kombiniranjem radnih staza oba para dobiva se radna staza komplementarnog para kao što je prikazano na slici.



Jednadžbe radnih staza tranzistora  $T_1$  i  $T_2$ :

$$u_{CE1} = U_{CC} - R_p i_p = U_{CC} - R_p (i_{C1} + i_{C2})$$

$$u_{CE2} = -U_{CC} - R_p i_p = -U_{CC} - R_p (i_{C1} + i_{C2})$$

Prema ovim relacijama radna staza tranzistora  $T_1$  ovisi o struji kolektora tranzistora  $T_2$ , dok radna staza tranzistora  $T_2$  ovisi o struji kolektora tranzistora  $T_1$ . Kako se statičke radne točke tranzistor  $Q_1$  i

$Q_2$  nalaze na granici normalnoga aktivnog područja i područja zapiranja, jedna od struja  $i_{C1}$  i  $i_{C2}$  uvijek je jednaka nuli. Kada je  $i_g > 0$ , tada je  $i_{C1} > 0$  i  $i_{C2} = 0$ , dobivamo relacije

$$u_{CE1} = U_{CC} - R_p i_{C1} = U_{CC} - u_p, \quad u_{CE2} = -U_{CC} - R_p i_{C1} = -U_{CC} - u_p$$

A kada je  $i_g < 0$ , tada je  $i_{C1} = 0$  i  $i_{C2} < 0$ , pa relacije prelaze u oblik

$$u_{CE1} = U_{CC} - R_p i_{C2} = U_{CC} - u_p, \quad u_{CE2} = -U_{CC} - R_p i_{C2} = -U_{CC} - u_p$$

Iz prve dvije relacije slijedi da je  $u_{CE1} = u_{CE2} + 2U_{CC}$

Kada tranzistor  $T_1$  ne vodi, a  $T_2$  vodi i pritom dodje do granice područja zasićenja, tada je

$$|u_{CE2}| \ll 2U_{CC}, \text{ te je } u_{CE2} \cong 2U_{CC}$$

Kada  $T_1$  prestane voditi, tada je  $u_{CE1} \cong U_{CC}$ .

Odredit ćemo odnose snaga ovog protutaktnog pojačala

$$u_p = R_p i_p \cong R_p (i_{C1} + i_{C2})$$

Ako se tjemene vrijednosti veličina  $u_p$  i  $i_p$  označe sa  $I_{pm}$  i  $U_{pm}$ , tada je

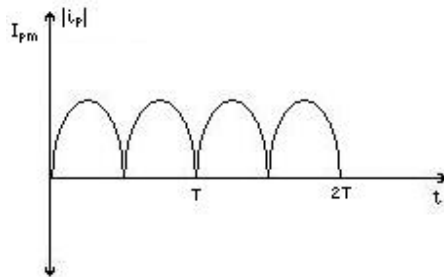
$$U_{pm} = R_p I_{pm}$$

Srednja vrijednost snage signala predanog potrošaču iznosi

$$P_p = \frac{1}{2} U_{pm} I_{pm} = \frac{1}{2} I_{pm}^2 R_p$$

Ukupna snaga koju obje kolektorske baterije predaju sklopu iznosi

$$P_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{CC} |i_p| dt$$



Ovdje je prikazana veličina  $|i_p|$

Uvrštavanjem  $i_p = I_{pm} \sin \omega t$  u  $P_{CC}$  dobiva se

$$P_{CC} = \frac{2}{\pi} U_{CC} I_{pm}$$

Pema tome efikasnost (korisnost) pojačala iznosi

$$\eta = \frac{P_p}{P_{CC}} = \frac{\pi}{4} \frac{R_p}{U_{CC}} I_{pm}$$

Maksimalni  $U_{pm}$  jednak je  $U_{CC}$ , ako se zanemari napon zasićenja, pa je maksimalni iznos efikasnosti

$$\eta_{\max} = \frac{\pi}{4} = 78,5\%$$

Kada je  $I_{pm} = I_{CM}$ , gdje je  $I_{CM}$  maksimalna dozvoljena struja kolektora, kolektorske baterije su najopterećenije i daju snagu

$$P_{CC, \max} = \frac{2}{\pi} U_{CC} I_{CM}$$

Snaga signala predanog potrošaču raste s kvadratom amplitude struje kroz potrošač. Iz ovoga slijedi da je efikasnost pojačala u klasi B veća nego efikasnost pojačala u klasi A.

Maksimalnu snagu koju možemo postići pojačalom snage klase B data je izrazom

$$P_{PM} = \frac{1}{2} \frac{U_{CEM}}{2} I_{CM} = \frac{1}{4} U_{CEM} I_{CM}$$

Veću snagu od navedene nije moguće dobiti, a da se ne prekorače strujne i naponske granice tranzistora.