

# POJAČAVAČI SNAGE

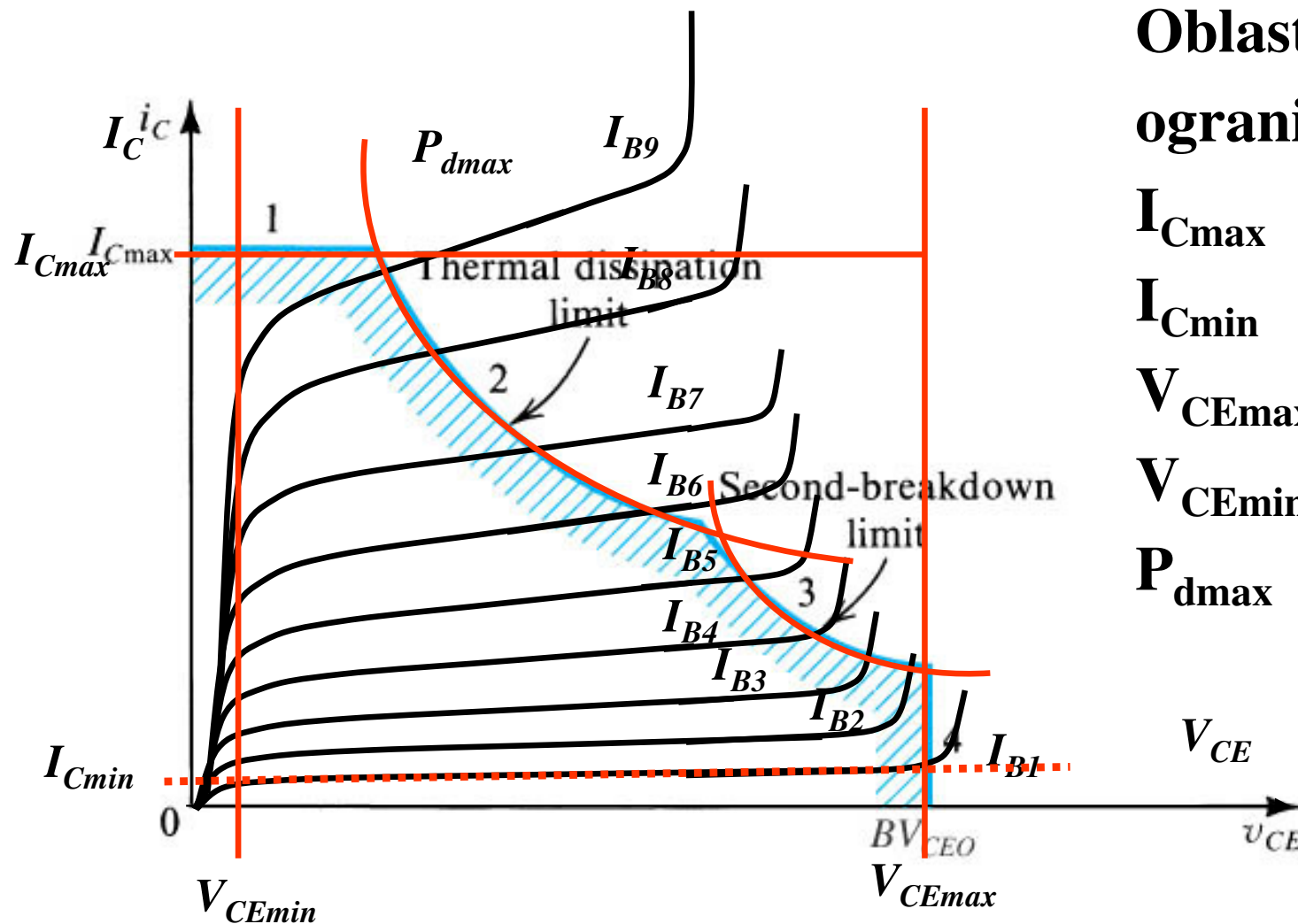
# Uvod

---

- **Pojačavači snage** projektuju se tako da snaga preneti na potrošač ima maksimalnu vrednost. Ovi pojačavači koriste se na kraju pojačavačkog lanca kao izlazni stepen. Kod pojačavača snage radna tačka se kreće između ekstremnih vrednosti za razliku od **naponskih pojačavača** gde su promene amplituda struja i napona male u odnosu na maksimalne moguće vrednosti.
- S obzirom da se koristi cela radna oblast tranzistora uključujući i nelinearni deo izlazni signal je više izobličen nego kod naponskih pojačavača. Kao posledica toga pri analizi pojačavača snage ne važe linearni modeli koji su korišćeni kod naponskih pojačavača.
- Dva osnovna kriterijuma za ocenu pojačavača snage su:
  - **Stepen korisnog dejstva**  $\eta$ , koji predstavlja efikasnost prenošenja snage izvora napajanja u korisnu snagu.
  - **Koeficijent harmonijskih izobličenja** (THD) koji je merilo nelinearnih izobličenja.

# Oblast bezbednog rada

Od pojačavača velikih signala očekuje se da koristi se što veću oblast rada tranzistora!



Oblast rada  
ograničena je sa

$I_{Cmax}$

$I_{Cmin}$

$V_{CEmax} = BV_{CE}$

$V_{CEmin} = V_{CEsat}$

$P_{dmax}$

# Oblast bezbednog rada

---

Da bi se omogućilo pravilno funkcionisanje pojačavača snage neophodno je poznavati ograničenja koja se odnose na struju napon i snagu. Radna tačka tranzistora mora svo vreme da bude u oblasti bezbednog rada.

Oblast sigurnog rada ograničena je sa:

- **Maksimalna struja kolektora  $I_{cmax}$**

Pri povećanju struje kolektora samnjuje se koeficijent strujnog pojačanja. Maksimalna vrednost struje kolektora određena je pre svega minimalnom prihvatljivom vrednošću koeficijenta strujnog pojačanja.

- **Maksimalni kolektorski napon  $V_{CEmax}$**

Ukoliko se napon na kolektorskom spoju suviše poveća može doći do lavinskog proboja. S obzirom na vrednosti koncentracija nosilaca ovaj proboj se obično dešava pri vrednosti napona od nekoliko destina volti.

# Oblast bezbednog rada

---

- **Maksimalna snaga disipacije  $P_{dmax}$**

Snaga disipacije povećava temperaturu spoja. Na svakoj temperaturi se uspostavlja ravnoteža između snage koja se disipira na spoju i toplota koja se odvodi sa spoja. Pri tome ne sme da dodje do premašanja maksimalno dozvoljene temperature spoja jer onda dolazi do uništenja komponente.

- **Minimalna struja kolektora  $I_{cmin}$**

Kada radna tačka dosegne vrednost  $I_{cmin}$  tranzistor je na granici između aktivne oblasti i zakočenja.

- **Minimalna napon između kolektora i emitora  $V_{CEmin}$**

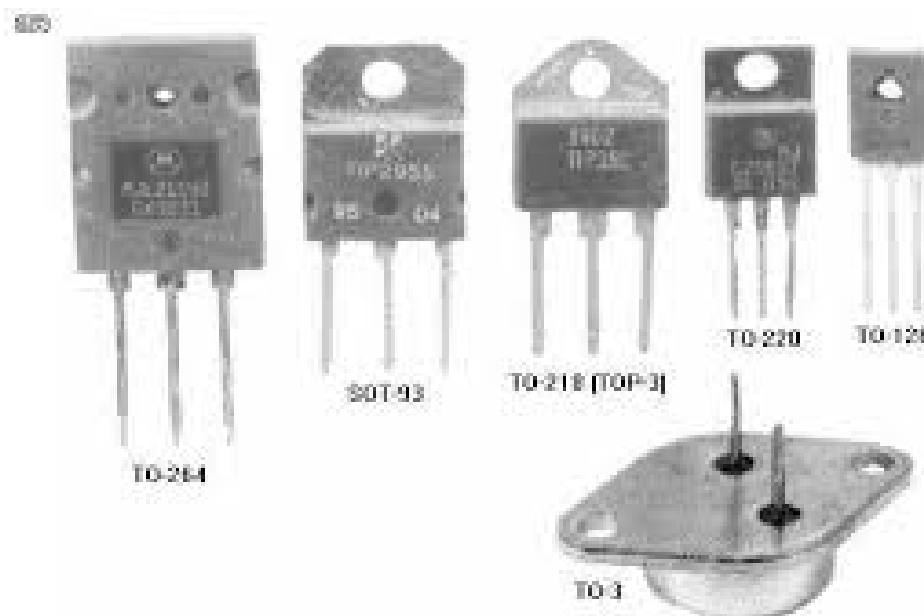
Kada je tranzistor u aktivnoj oblasti rada napon između kolektora i emitora ne može neograničeno da se smanjuje. Tranzistor je na granici između aktivne oblasti i zasićenja kada je napon između kolektora i emitora

$$V_{CE} = V_{CES} \approx 0,2 V.$$

# POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA

---

Tranzistori snage su većih dimenzija u odnosu na standardne tranzistore jer su predviđeni za veće vrednosti snage disipacije. Veća površina emitorskog pn spoja omogućava bolje hladjenje tranzistora.



# POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA

---

Generalno, za svaki uređaj definiše se pojam uložene snage i korisne snage. U ovom slučaju uložena snaga je zbir snage jednosmernog izvora napajanja  $P_{DC}$  i snage pobudnog signala,  $P_i$ . Korisna snaga je snaga signala na izlazu. Jedan deo snage koja se dobije od jednosmernog izvora napajanja i od pobudnog signala se dispira na komponentama.

Uložena snaga je povezana sa korisnom snagom i disipiranom snagom preko **jednačine balansa snaga**:

$$P_{DC} + P_i = P_D + P_k$$

$P_{DC}$  je snaga jednosmernog izvora napajanja,  $P_i$  snaga pobudnog signala,  $P_D$  disipirana snaga,  $P_O$  snaga signala na izlazu ili korisna snaga.

S obzirom da uvek postoje gubici odnosno disipacija, **uložena snaga** mora biti veća od utrošene snage, odnosno **korisne snage**.

$$P_{DC} + P_i > P_k$$

# POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA

---

Na izlazu pojačavača, odnosno na potrošaču, razvija se veća snaga od snage koju pojačavaču predaje izvor signala. Ovu razliku u snazi obezbeđuje jednosmerni izvor napajanja. Da bi pojačavač funkcionisao neophodan je jednosmerni izvor napajanja,  $V_{CC}$ , iz koga pojačavač pojačavač “crpi” snagu.

Ukoliko pretpostavimo da je struja koja protiče kroz jednosmerni naponski generator  $V_{CC}$  periodična sa periodom  $T$ , onda je snaga koju ovaj generator predaju kolu:

$$P_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{CC}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \cdot i_{CC}(t) dt$$

$$P_{CC} = V_{CC} \cdot I_{CC}$$

Gde je:  $P_{CC}$  srednja vrednost snage izvora napajanja,  $p_{CC}(t)$  trenutna snaga izvora napajanja,  $I_{CC}$  srednja vrednost struje kroz izvor napajanja.



## Stepen iskorišćenja

---

**Stepen korisnog dejstva**,  $\eta$ , predstavlja odnos korisne i snage izvora napajanja,

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

Idealni pojačavač snage bio bi onaj koji ima stepen iskorišćenja  $\eta=100\%$  ( $P_K=P_{CC}$ ). To bi značilo da snaga izvora za napajanje bez gubitaka dođe do potrošača. Takvi pojačavači **NE POSTOJE**.

# Snaga disipacije

---

I na emitorskom i na kolektorskom pn spoju se troši određena snaga zbog otpornosti pn spoja. Na kolektorskom spoju se troši mnogo veća snaga nego na emitorskom spoju. Pošto je  $v_{CE}$  jednako zbiru napona na kolektoru i emitoru i  $i_E \approx i_C$ , trenutna snaga disipacije definiše kao:

$$p_d = v_{CE} i_C \quad (\text{za bipolarni tranzistor})$$

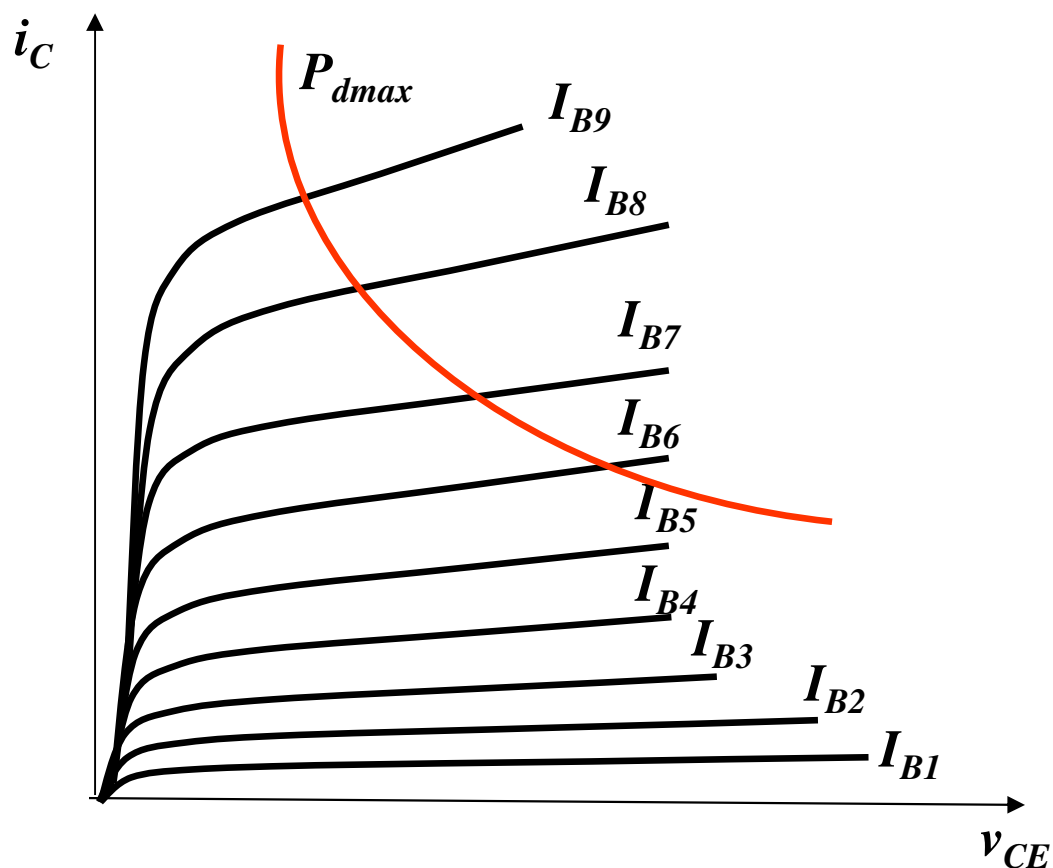
$$p_d = v_{DS} i_D \quad (\text{za FET/MOSFET})$$

Snaga disipacije se menja tokom vremena. Potrebno je utvrditi pri kojoj vrednosti signala trenutna snaga disipacije ima maksimalnu vrednost. Ukoliko u bilo kom trenutku trenutna snaga disipacije premaši vrednost **maksimalne snage disipacije**  $P_{dmax}$ , koja je tehnološki parametar i nalazi se u katalogima, tranzistor biva uništen.

# Snaga disipacije

Da bi se obezbedilo da ni u jednom trenutku snaga disipacije ne premaši maksimalno dozvoljenu vrednost u polje izlaznih karakteristika obeležava se **hiperbola disipacije** definisana sledećom jednačinom:

$$i_C \cdot v_{CE} = P_{Dmax}$$



U svakom trenutku je potrebno obezbediti da

$$p_D(t) < P_{Dmax}$$
$$i_C(t) \cdot v_{CE}(t) < P_{Dmax}$$

To praktično znači da radna prava (prava po kojoj se pomera radna tačka) mora da bude ispod hiperbole disipacije i ne sme da seče hiperbolu disipacije.

# Termička otpornost

---

## Disipacija u funkciji TEMPERATURE

Temperatura na spoju  $T_s$  je veća nego temperatura okoline i ona se menja sa promenom snage disipacije na sledeći način:

$$T_s = T_o + R_{th} \cdot P_D$$

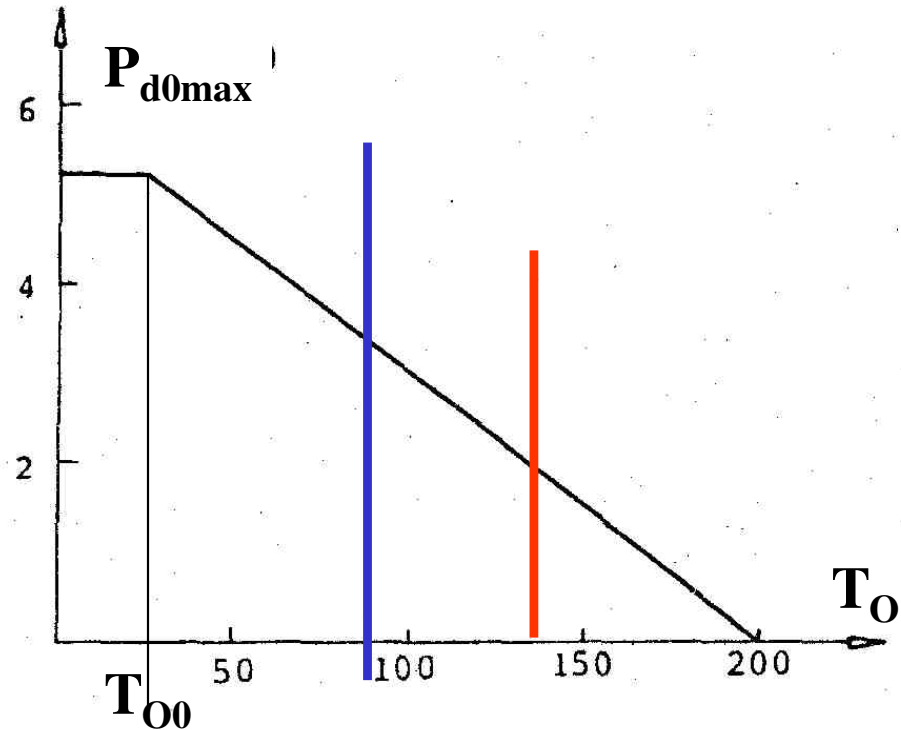
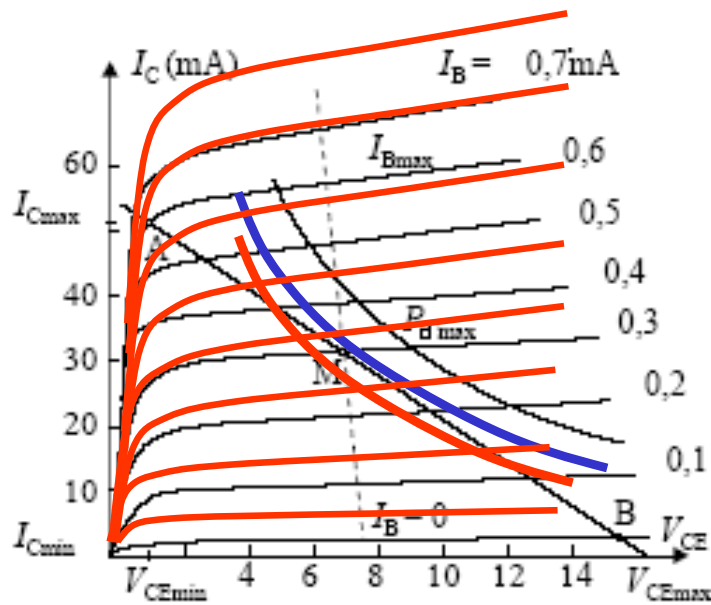
$R_{th}$  – termička otpornost,  $T_o$  - Temperatura okoline

Termička otpornost  $R_{th}$  zavisi od toga kako je izvedeno hlađenje tranzistora. Vrednost temperature spoja ne sme da predje vrednost pri kojoj je komponenta uništena,  $T_{smax}$ . Ukoliko se prekorači ova temperatura komponenta gubi svoja svojstva. Gornja granica maksimalne temperature spoja za silicijumski transistor je 150°C a za germanijumski 60°C. Iz gornje jednačine proizilazi da maksimalna snaga disipacije tranzistora pri spoljnoj temperaturi  $T_o$  iznosi:

$$P_{d \max} = \frac{T_{s \max} - T_o}{R_{th}}$$

# Termička otpornost

## Disipacija u funkciji TEMPERATURE



Sa promenom temperature menja se i vrednost maksimalne snaga disipacije. Što je veća temperatura okoline maksimalna disipacija snage se smanjuje i hiperbola disipacije se u skladu sa tim pomera.

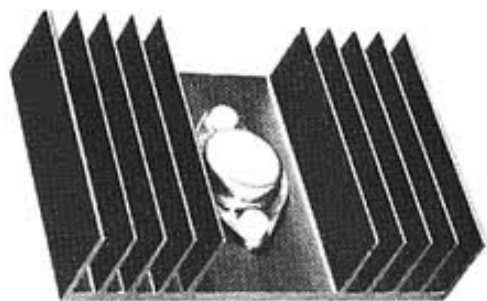
$$P_{d \max} = \frac{T_{S \max} - T_o}{R_{th}}$$

# Termička otpornost

---

Da bi se dobila veća vrednost maksimalne snage disipacije pri istoj temperaturi potrebno je da termička otpornost bude što manja.

Za efikasnije odvođenje temperature sa kućišta tranzistori većih snaga se montiraju na hladnjake. Hladnjaci se grade u obliku metalnih ploča sa većim brojem gusto raspoređenih rebara da bi se povećala površina sa koje odlazi toplota.



Pojačavači velikih signala



# Nelinearna izobličenja

---

Usled nelinearnosti prenosne karakteristike pojačavača pojavljuju se **nelinearna izobličenja** koja se manifestuju pojavom viših harmonika pri sinusnoj pobudi,  $v_i$ .

$$v_i = V_{mi} \cdot \cos \omega t$$

$$v_o = V_o + V_{mo} + V_{m1} \cdot \cos \omega t + V_{m2} \cdot \cos 2\omega t + \dots V_{mn} \cdot \cos(n\omega t) + \dots$$

$V_{m1}$  je amplituda osnovnog harmonika,

$V_{mi}$   $i=2,3,\dots$  su amplitude viših harmonika

Spektralne komponente viših harmonika su nepoželjne jer predstavljaju deo izlaznog signala koji ne postoji na ulazu. Što su veća nelinearna izobličenja veće su amplitude viših harmonika.

## Nelinearna izobličenja

Usled nelinearnosti prenosne karakteristike pojačavača pojavljuju se nelinearna izobličenja koja se manifestuju pojavom viših harmonika pri sinusnoj pobudi. Kao mera nelinearnih izobličenja pojačavača koristi se veličina koja se zove **koeficijent harmonijskog izobličenja** ili **klir faktor**.

**Klir faktor  $n$ -tog harmonika** signala  $x$ , definiše se kao odnos efektivne vrednosti napona  $n$ -tog harmonika i efektivne vrednosti napona osnovnog harmonika

$$k_n = \frac{V_{mn}}{V_{m1}}$$

**Ukupan klir faktor** je odnos efektivne vrednosti svih viših harmonika napona i efektivne vrednosti osnovnog harmonika napona.

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_{mi}^2}}{V_{m1}}$$



## Nelinearna izobličenja

---

Amplituda izlaznog signala osnovne frekvencije  $V_1$ , kao i amplitude viših harmonika  $V_n$  su funkcije od amplitude ulaznog signala. Odavde sledi da čak ni amplituda osnovnog harmonika nije linearno srazmerna amplitudi ulaznog signala.

Kada se za pojačavač daje specifikacija izobličenja neophodno je navesti pri kojoj vrednosti amplitude ulaznog signala su izobličenja merena. U praksi se obično navodi koja je bila vrednost snage na izlazu prilikom merenja harmonika.

Ukoliko je pobuda pojačavača složenoperiodičan signal (signal koji nije sinusni) tada se u izlaznom signalu pored viših harmonika pobudnog signala pojavljuju i **intermodulaciona izobličenja**.

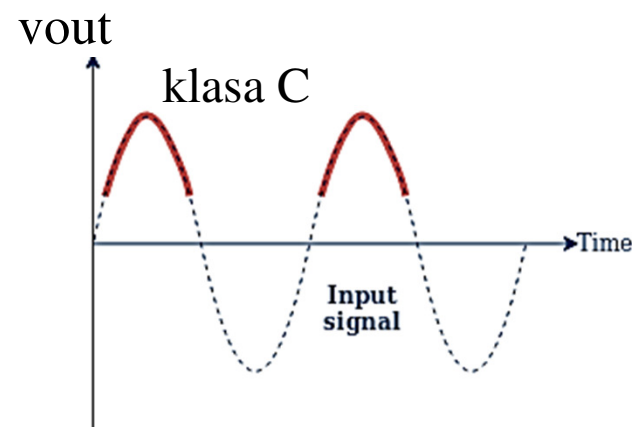
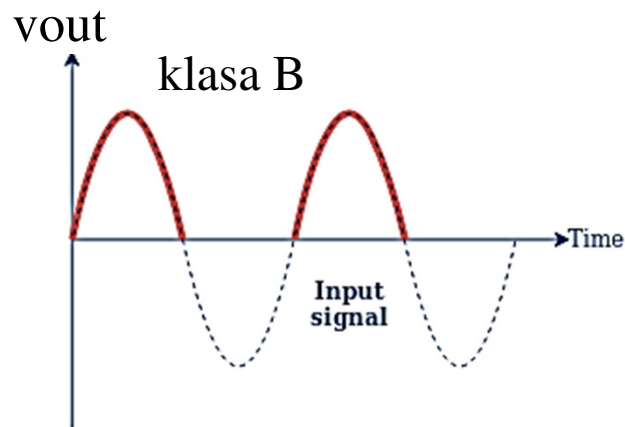
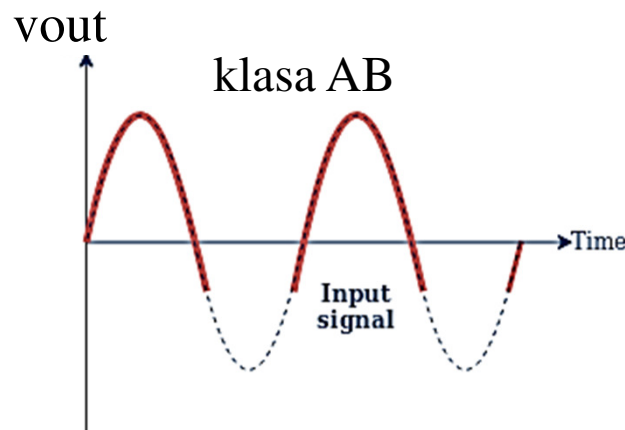
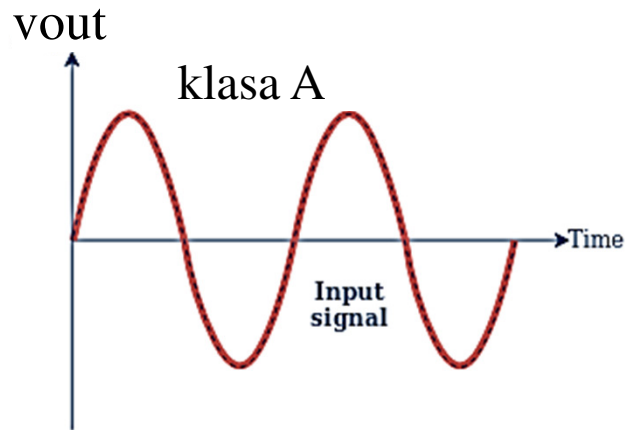
Intermodulacioni izobličenja se manifestuju na taj način što se u spektru izlaznog signala pojavljuju spektralne komponente na frekvencijama koje odgovaraju višim harmonicima kao i zbirovima i razlikama frekvencija ulaznog signala.

Ukoliko pobudni signal sadrži dve spektralne komponente  $\omega_1, \omega_2$  izlazni signal sadrži sledeće spektralne komponente:

$\omega_1, \omega_2, n \cdot \omega_1, n \cdot \omega_2, n \cdot \omega_1 \pm p \cdot \omega_2$  gde je  $n=1,2,3,\dots$   $p=1,2,3,\dots$

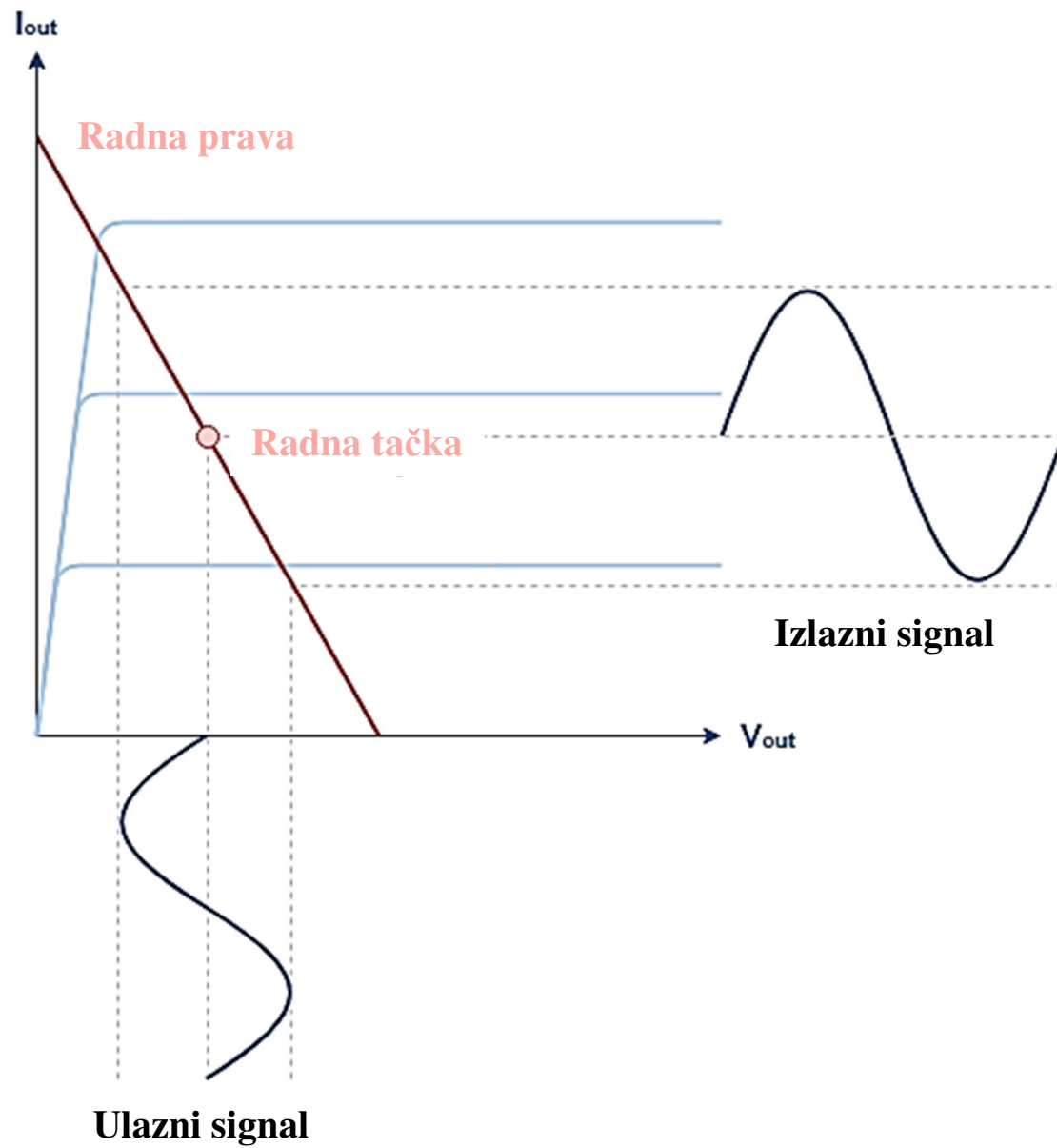
# Klasifikacija pojačavača snage

Pojačavači snage se klasifikuju prema tome koliki deo periode čini vremenski interval u toku koga tranzistor vodi, odnosno pojačava signal. Najšire zastupljeni pojačavači snage su pojačavači u klasama: A, B, AB, C. Pojačavači u klasama A, B i AB su **širokopojasni pojačavači** dok se klasa C predstavlja **selektivni pojačavač**. Selektivni pojačavači pojačavaju signal u uskom frekvencijskom opsegu primenom oscilatornih kola.



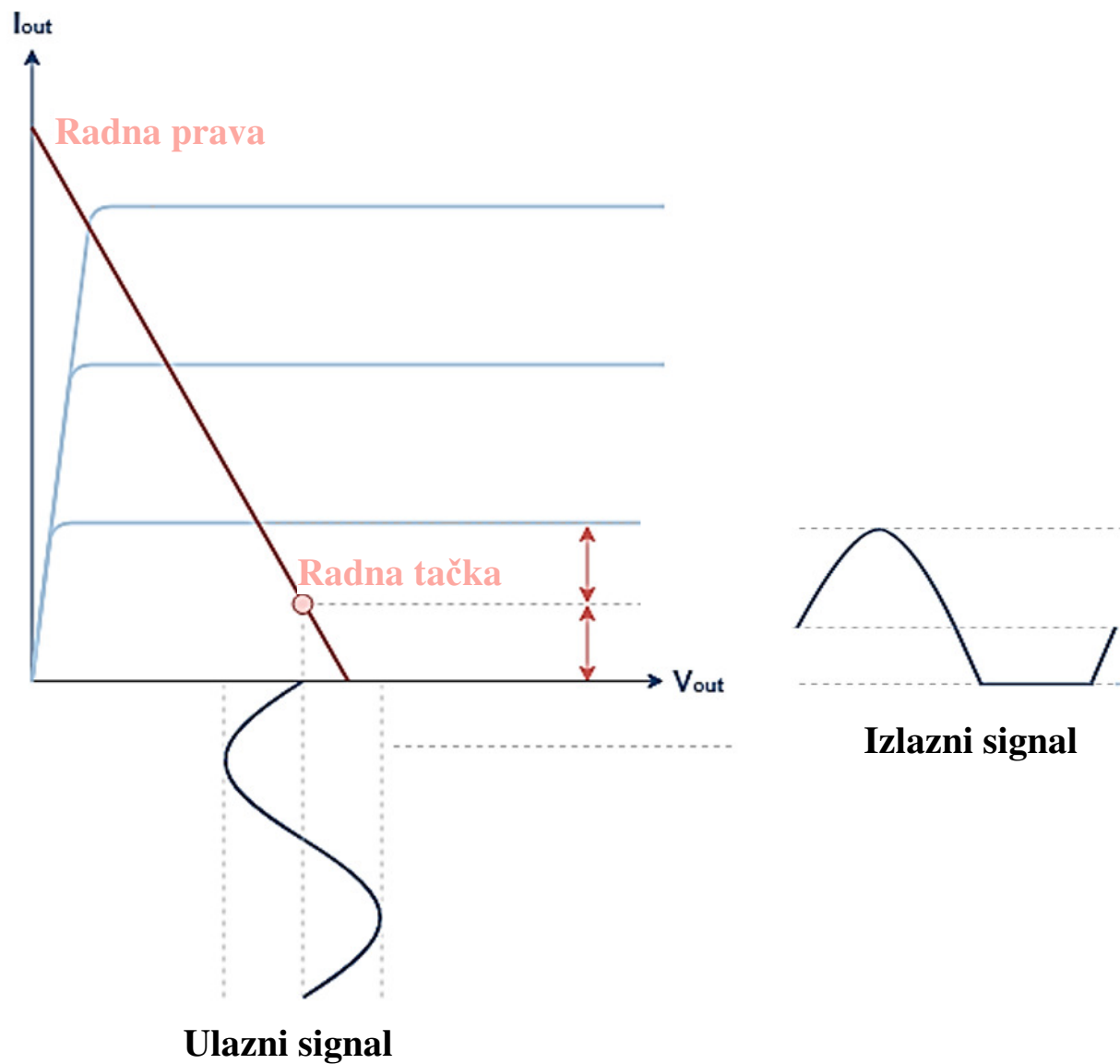
# Klasifikacija pojačavača snage

## Klasa A



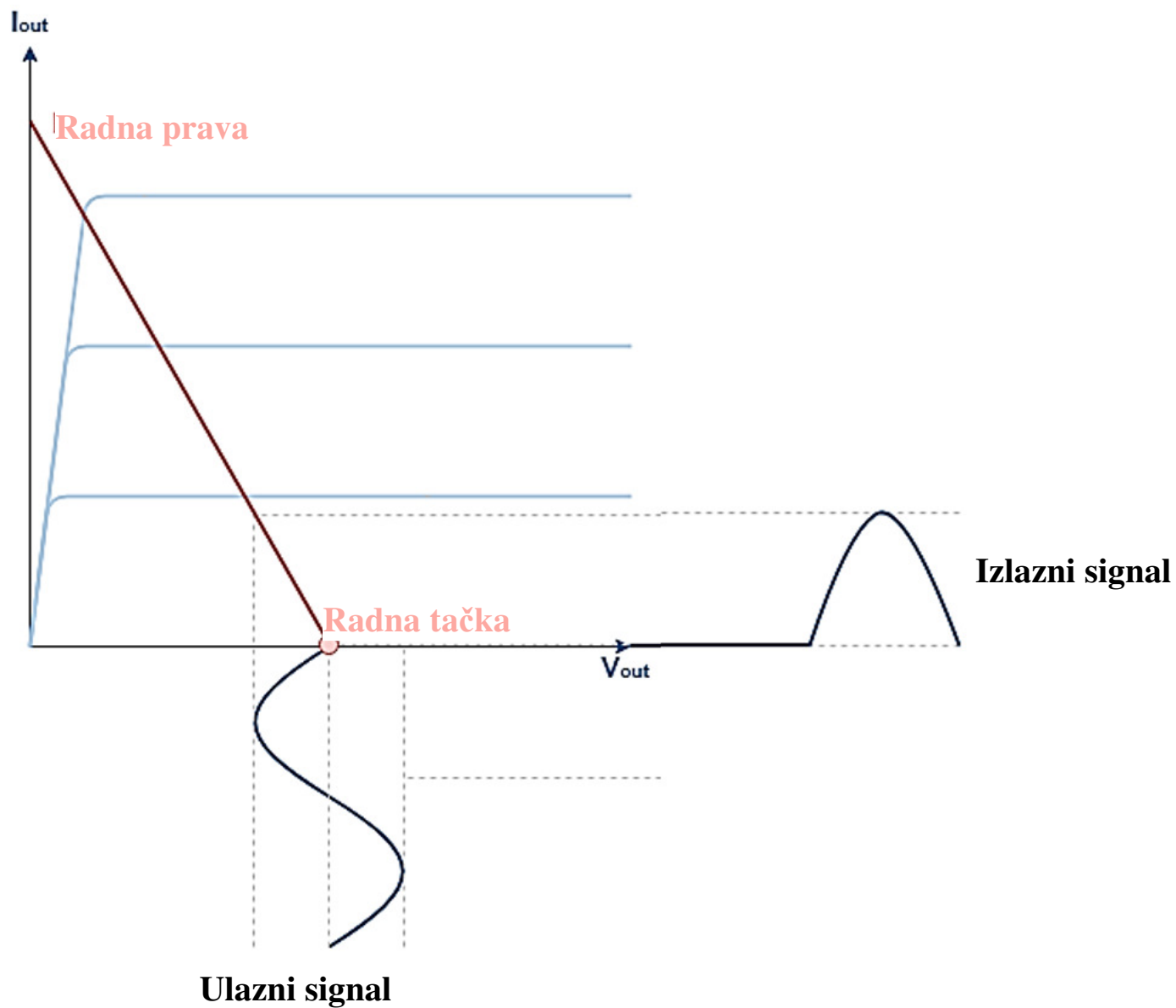
# Klasifikacija pojačavača snage

## Klasa AB



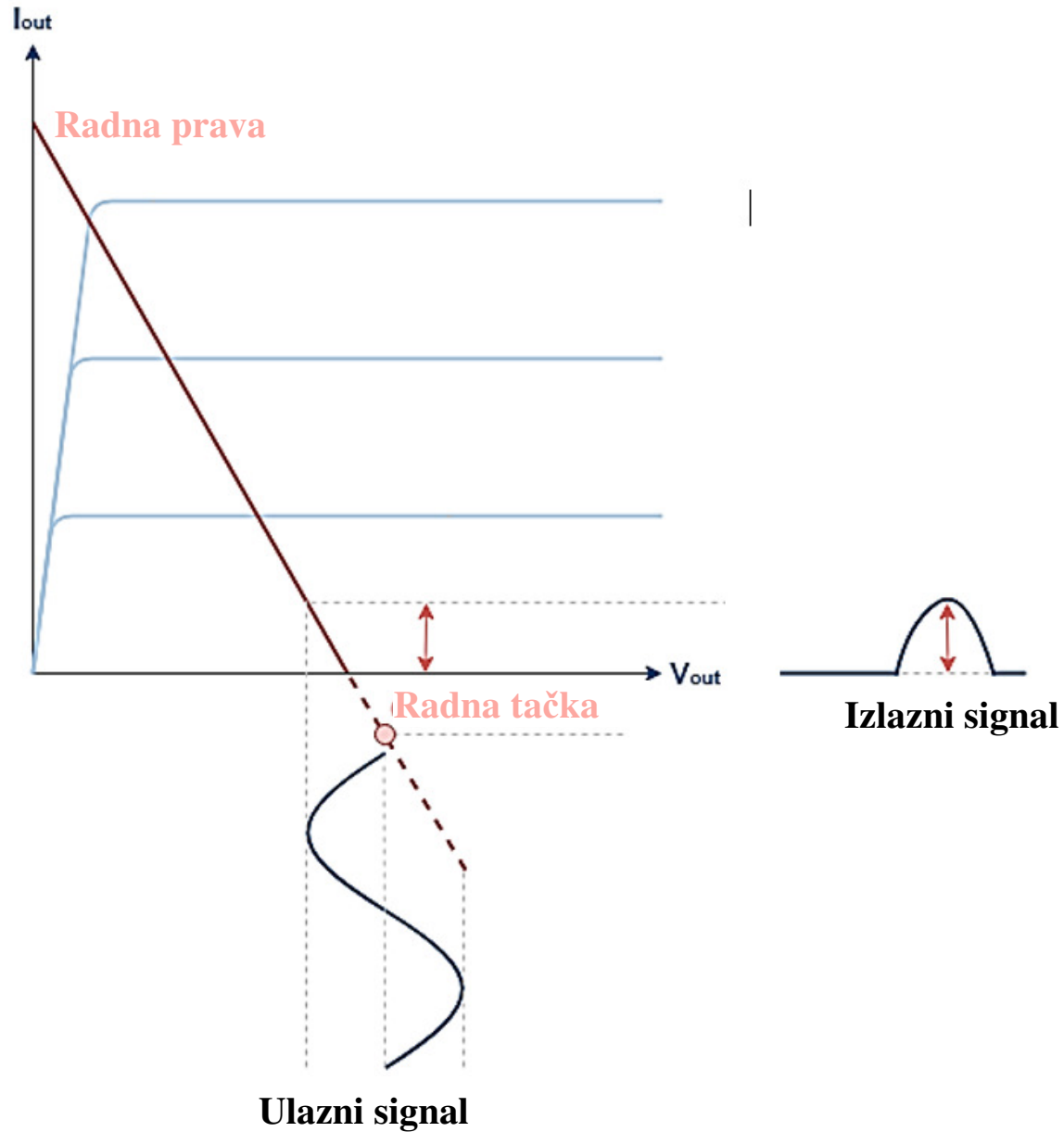
# Klasifikacija pojačavača snage

## Klasa B



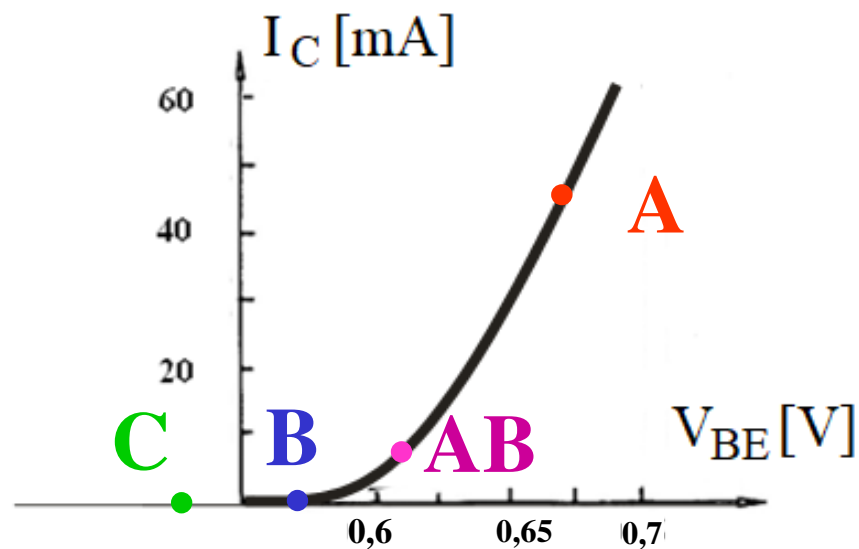
# Klasifikacija pojačavača snage

## Klasa C



# Klasifikacija pojačavača snage

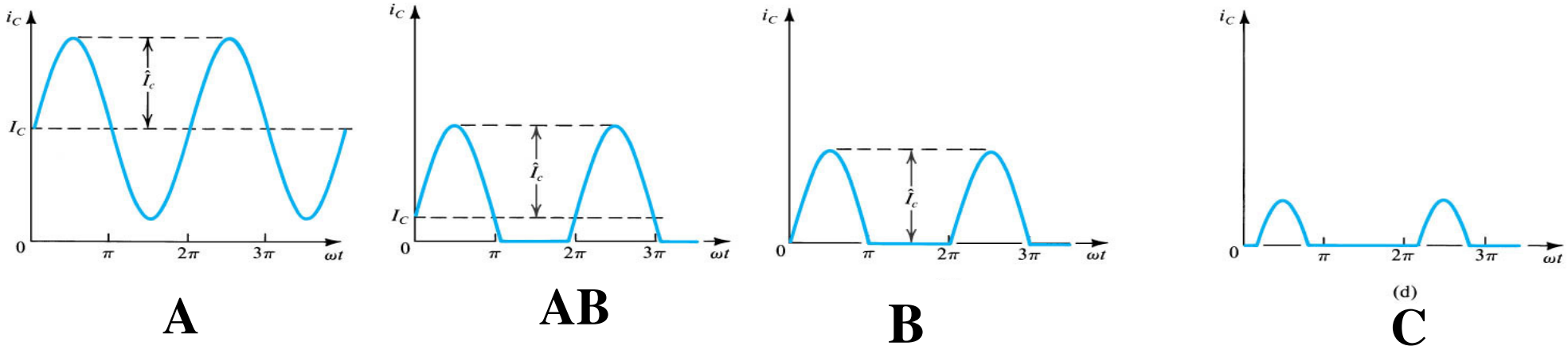
Položaj radne tačke tranzistora na na prenosnoj karakteristici određuje u kojoj klasi radi pojačavač.



Strujno-naponska prenosna karakteristika

# Klasifikacija pojačavača snage

## Klasifikacija pojačavača prema radnoj tački (A, B, AB, C)

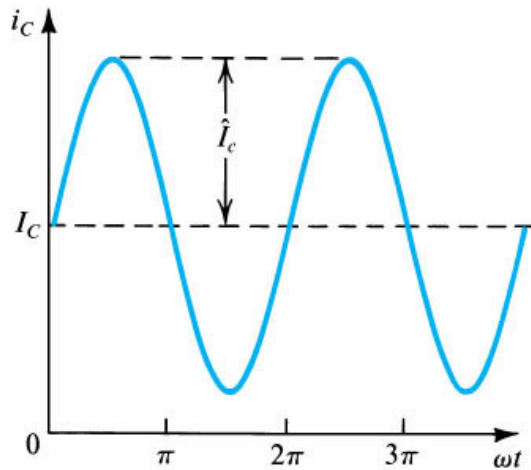


- U klasi A tranzistor je uvek u aktivnom režimu
- U klasi B tranzistor je u aktivnom režimu samo tokom jedne poluperiode
- U klasi AB tranzistor je u aktivnom režimu tokom jedne poluperiode i nešto kratko tokom druge
- U klasi C tranzistor je u aktivnom režimu tokom kratkog intervala

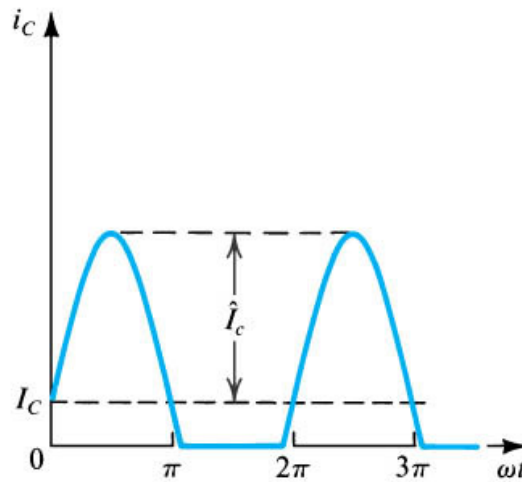


# Klasifikacija pojačavača snage

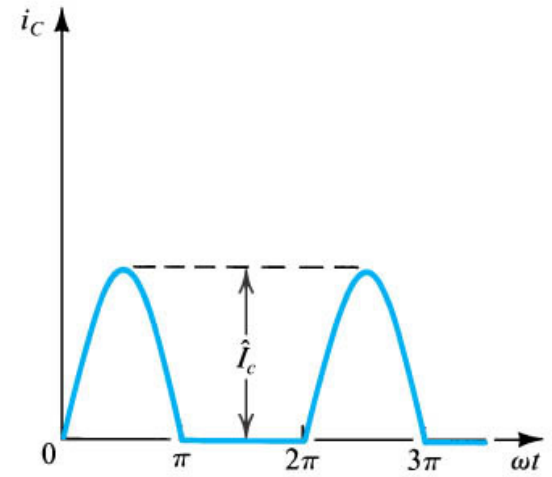
## Klasa A, B i AB



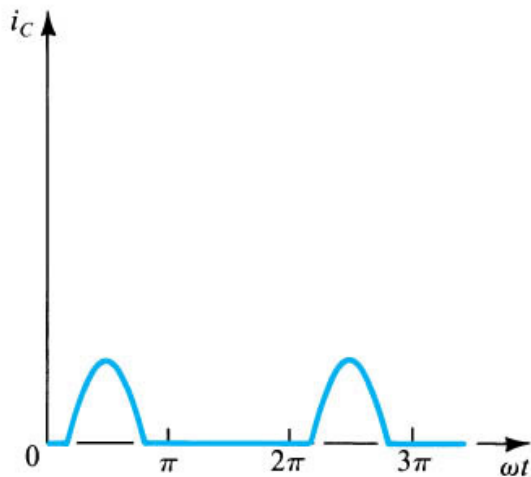
**A**



**AB**



**B**



(d)

**C**

**Ugao proticanja  $\theta$** , je deo periode ulaznog signala tokom kojeg tranzistor vodi.

$$\theta = 2\pi \cdot \frac{\Delta t}{T}$$

T je perioda signala,

$\Delta t$  je vremenski interval u toku koga tranzistor vodi

	A	AB	B	C
Ugao proticanja $\theta$	$360^\circ$	$180^\circ \div 360^\circ$	$180^\circ$	$< 180^\circ$

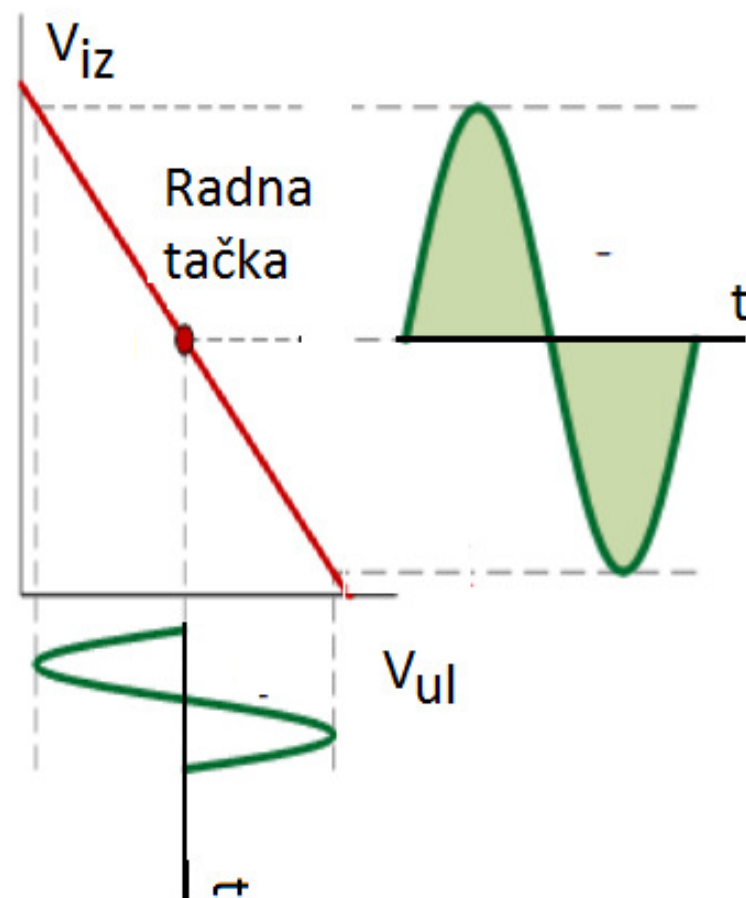
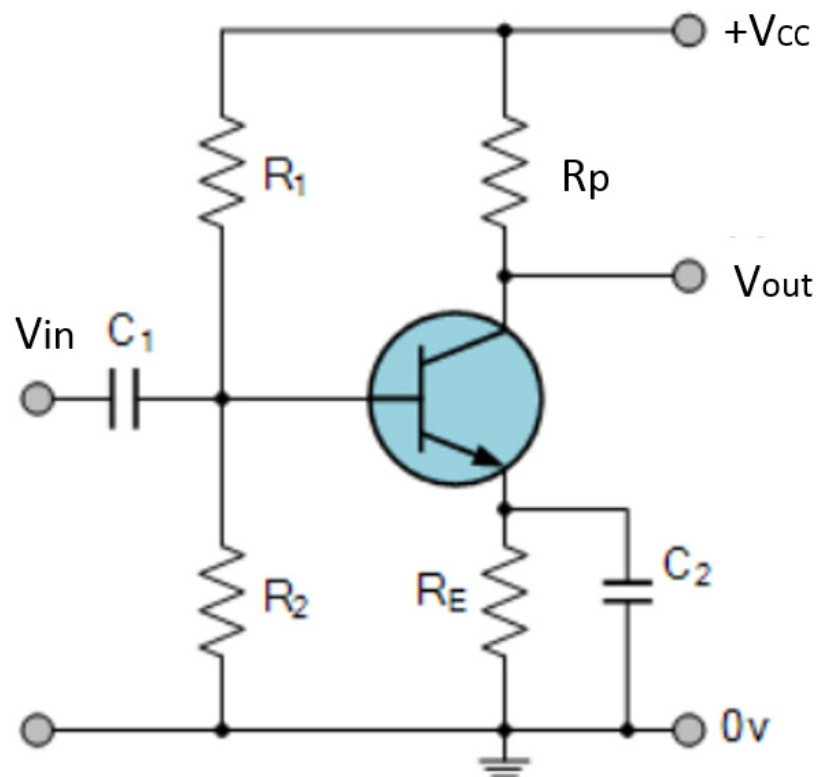
# POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA

---

Pojačavač snage klase A

# Pojačavač snage klase A sa bipolarnim tranzistorom

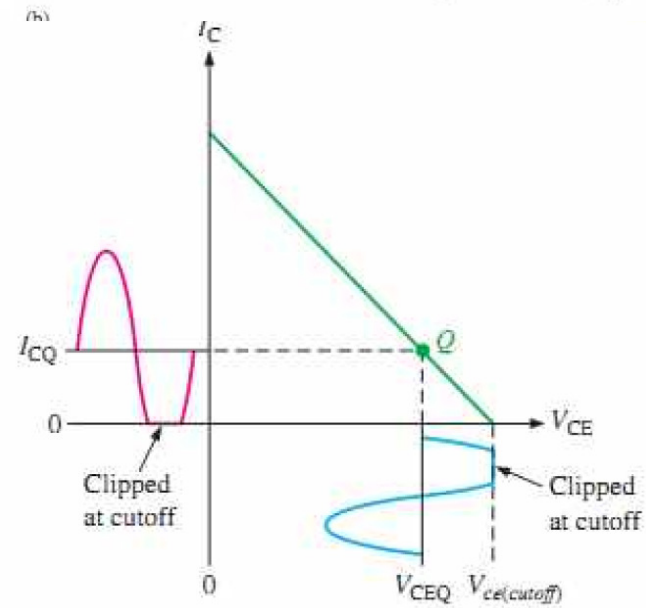
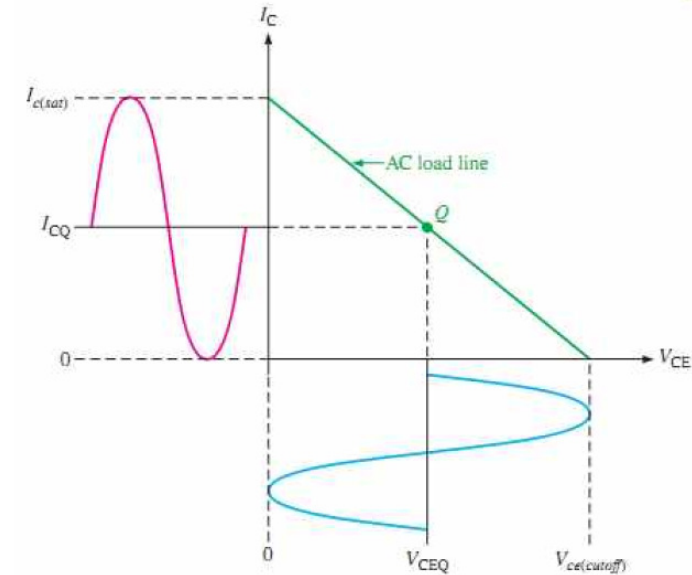
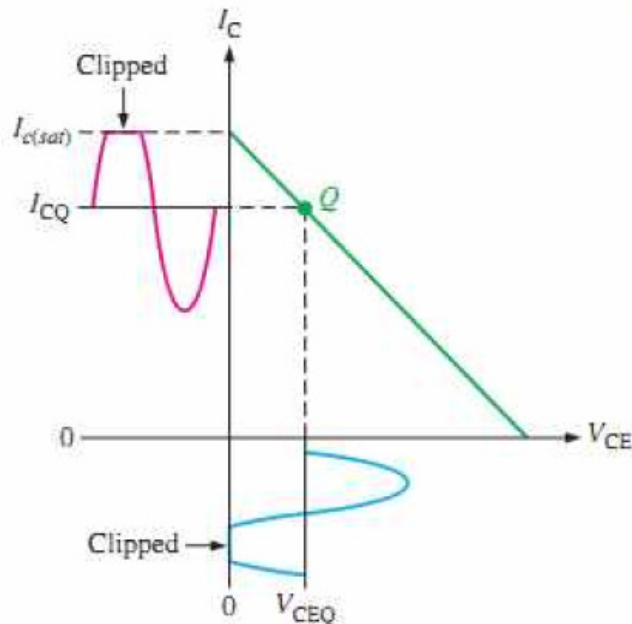
## Pojačavač snage u klasi A sa bipolarnim tranzistorom



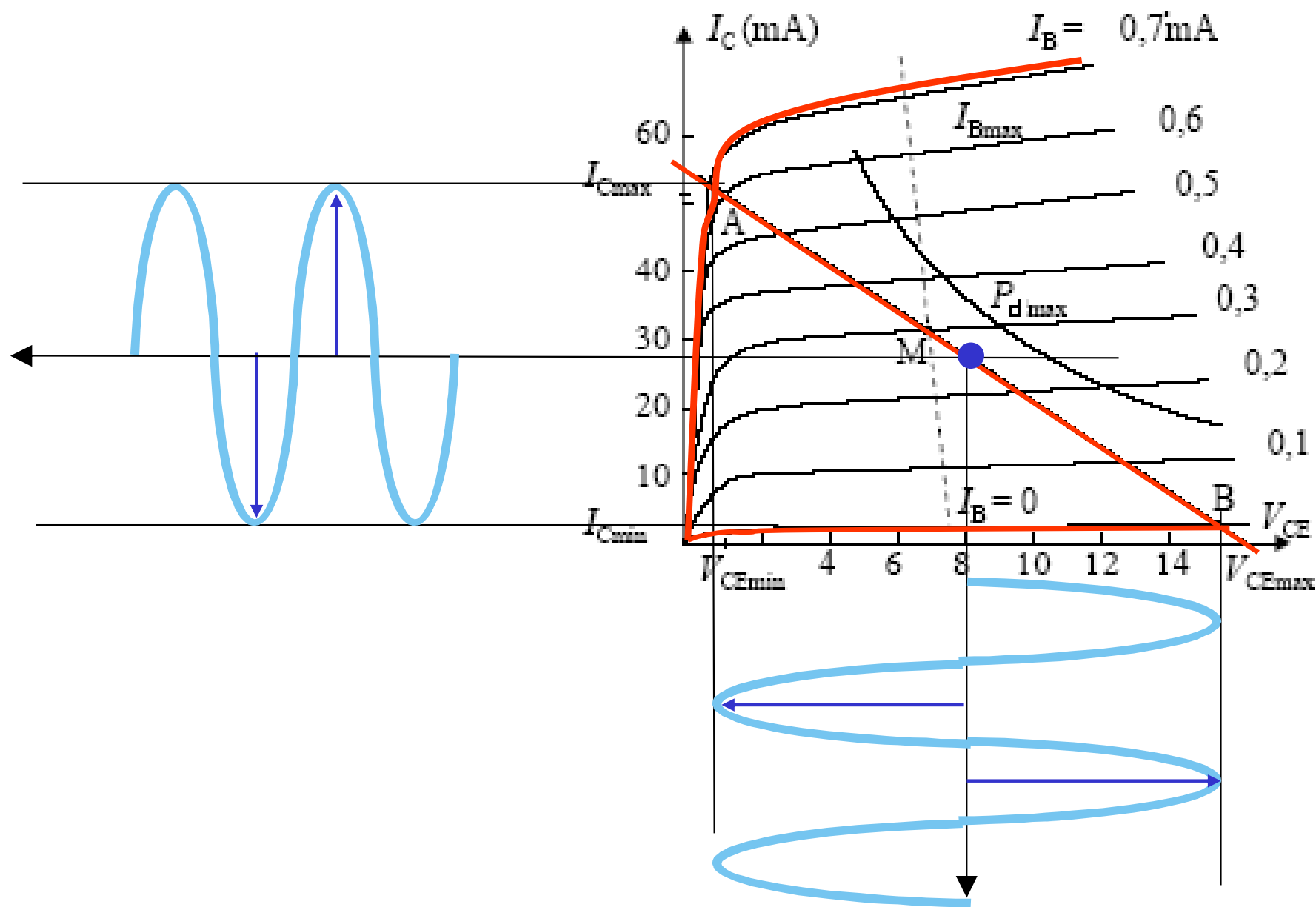
# Pojačavač snage klase A sa bipolarnim tranzistorom

Gde postaviti radnu tačku da bi se dobio maksimalni neizobličen signal na izlazu?

Radna tačka treba da bude postavljena na sredini radne prave da bi amplituda neizobličenog signala imala maksimalnu vrednost.



# Pojačavač snage klase A sa bipolarnim tranzistorom



## Izbor radne tačke pojačavača

---

Prilikom izbora radne tačke pojačavača u klasi A potrebno je da budu zadovoljena sledeća dva uslova:

- 1) Kada je radna tačka na sredini radnog dela karakteristike dobija se maksimalna vrednost amplitude neizobličenog signala  
$$I_{CM} = \frac{I_{Cmax}}{2} .$$
- 2) Da bi se dobila što veća snaga potrebno je da radna prava tangira hiperbolu snage  $P_{dmax}$ . Radna tačka ne sme ni u jednom trenutku da bude u oblasti u kojoj je snaga disipacije veća od dozvoljene  $P_{dmax}$ .

# Izbor radne tačke pojačavača

Najveća amplituda izlaznog napona se dobija kada je radna tačka podešena tako da  $V_{CEM} = \frac{V_{CEmax}}{2} = \frac{V_{CC}}{2}$  i  $I_{CM} = \frac{I_{Cmax}}{2}$

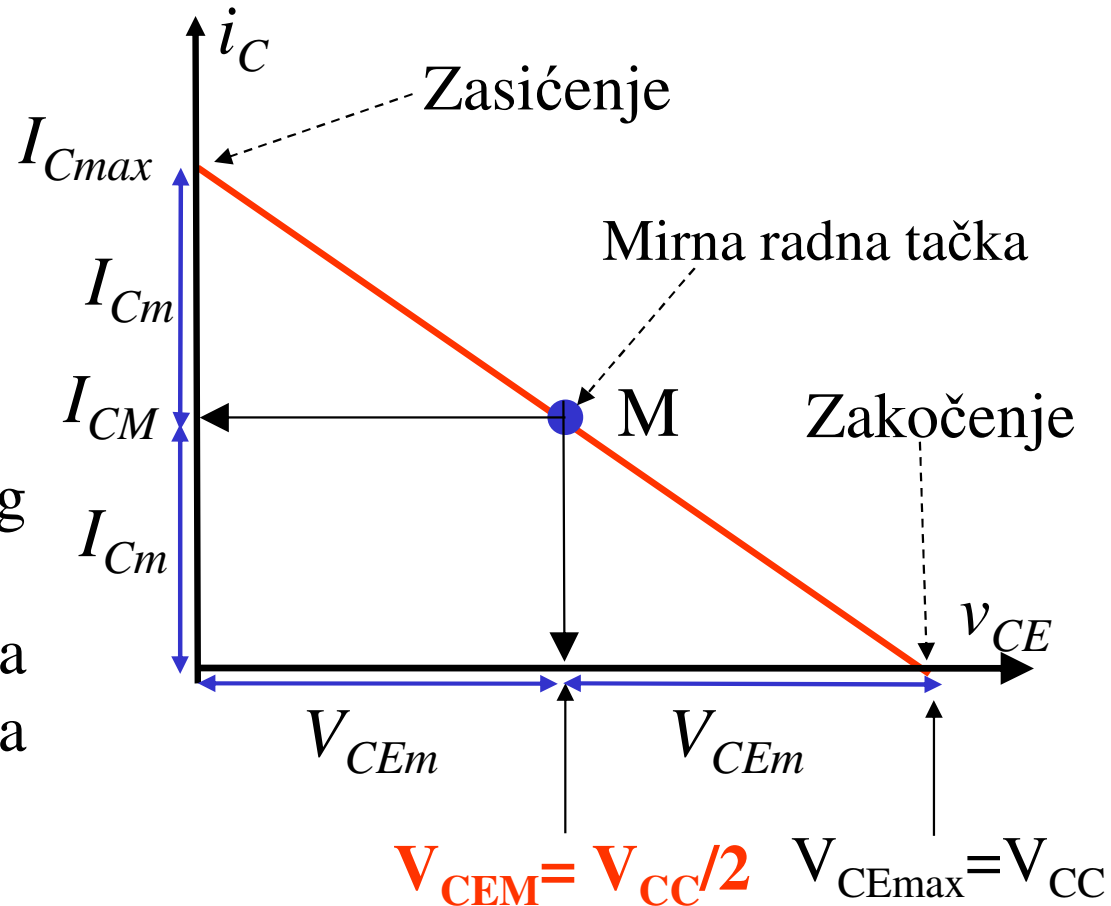
Kada je radna tačka podešena na taj način amplituda izlaznog napona iznosi približno

$$V_{CEm} \approx V_{CC}/2$$

a amplituda izlazne struje

$$I_{Cm} = I_{CM}$$

Pri maksimalnoj amplitudi izlaznog signala radna tačka tranzistora će se pomerati između oblasti koja je na granici zasićenja i oblasti koja je na granici zakočjenja.



U izrazu za amplitudu napona zanemaren je napon između kolektora i emitora u zasićenju jer je:  $V_{CEmin} = V_{CES} = 0,2 V$   $V_{CES} \ll V_{CC}$ .

# Stepen iskorišćenja pojačavača u klasi A

Srednja vrednost korisne snage  $P_k$  je:

$$P_k = \frac{1}{T} \int_0^T p_k(t) dt$$

$$P_k = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CEm} \sin(\omega t) I_{cm} \sin(\omega t) dt$$

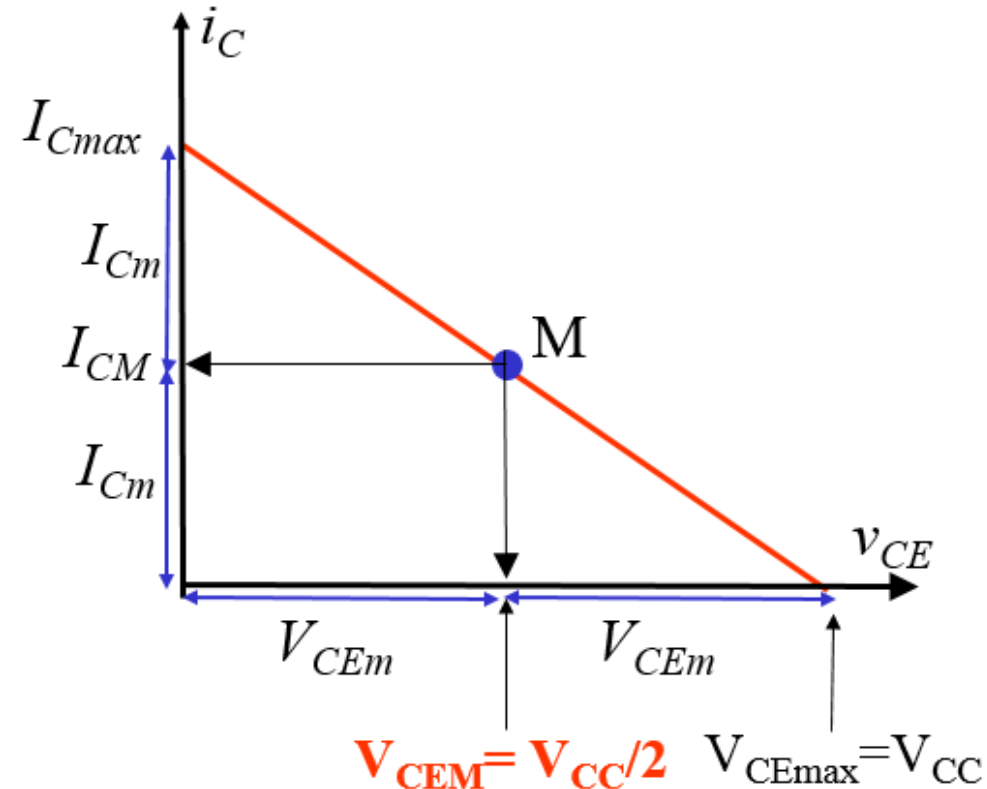
$$P_k = \frac{V_{CEm} \cdot I_{cm}}{2}$$

Maksimalna korisana snaga se dobija kada je radna tačka na sredini aktivne oblasti rada:

Maksimalna amplituda napona:

Maksimalna amplituda struje:

**Maksimalna korisana snaga**



$$V_{CEm} = \frac{V_{CEmax} - V_{CEmin}}{2} \approx \frac{V_{CC} - 0}{2}$$

$$I_{Cm} = \frac{I_{Cmax} - I_{Cmin}}{2} \approx I_{CM}$$

$$P_k = \frac{1}{2} V_{CEm} I_{Cm} = \frac{1}{4} \cdot V_{CC} \cdot I_{cm}$$



# Stepen iskorišćenja pojačavača u klasi A

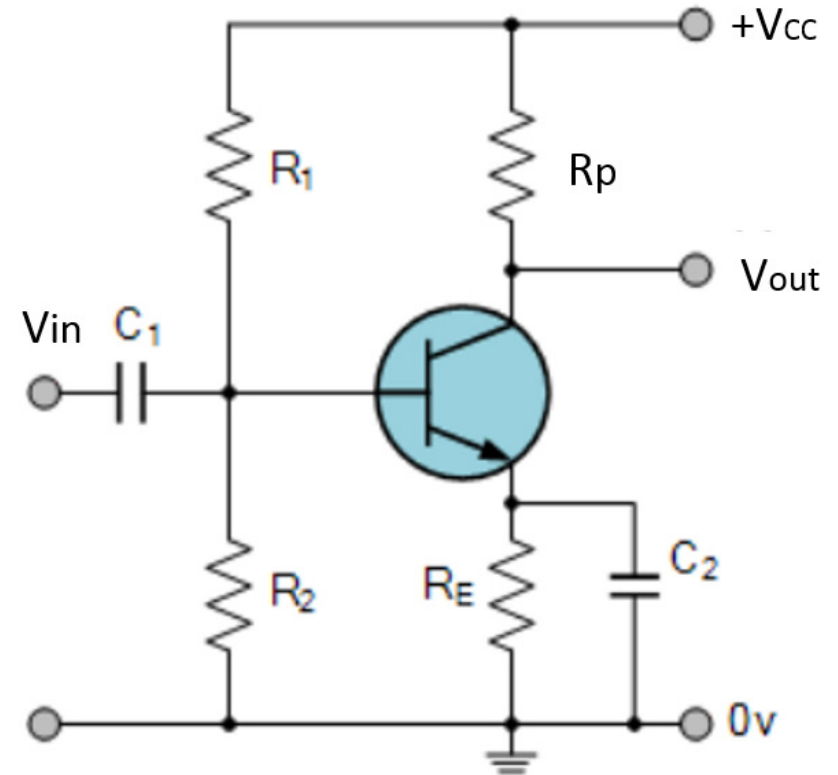
**Snaga koju daje jednosmerni izvor napajanja:**

$$P_{CC} = V_{CC} I_{CC}$$

$$I_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T i_C(t) dt$$

$$I_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T (I_{CM} + I_{cm} \sin \omega t) dt = I_{CM}$$

$$P_{CC} = I_{CM} \cdot V_{CC}$$



Srednja vrednost struje koja protiče kroz izvor napajanja  $I_{CC}$  jednaka je jednosmernoj struji kolektora. U ovom izrazu zanemarena je struja koja teče u kolu baze jer je ona znatno manja od struje kolektora.

## Stepen iskorišćenja pojačavača u klasi A

---

Stepen iskorišćenja je odnos korisne snage i snage koju izvora napajanja predaje kolu.

**Najveća moguća vrednost stepena iskorišćenja pojačavača snage koji rade u klasi A** dobija se kada je najveća amplituda izlaznog signala.

$$\eta_{\max} = \frac{P_k}{P_{CC}} = \frac{\frac{1}{2} V_{CEm} I_{Cm}}{V_{CC} I_{CM}} = \frac{1}{4} \frac{V_{CC} I_{CM}}{V_{CC} I_{CM}} = 0.25$$

Teoretski

$$\eta_{\max} = 25\%$$

Praktično

$$\eta < 20\%$$

## Pojačavači snage u klasi A

---

□ Pojačavače snage u klasi A karakteriše:

- Vrlo mala izobličenja (mali klir faktor).
- Maksimalna vrednost stepena korisnog dejstva je 25%.

▪ Velika disipacija snage na aktivnom elementu

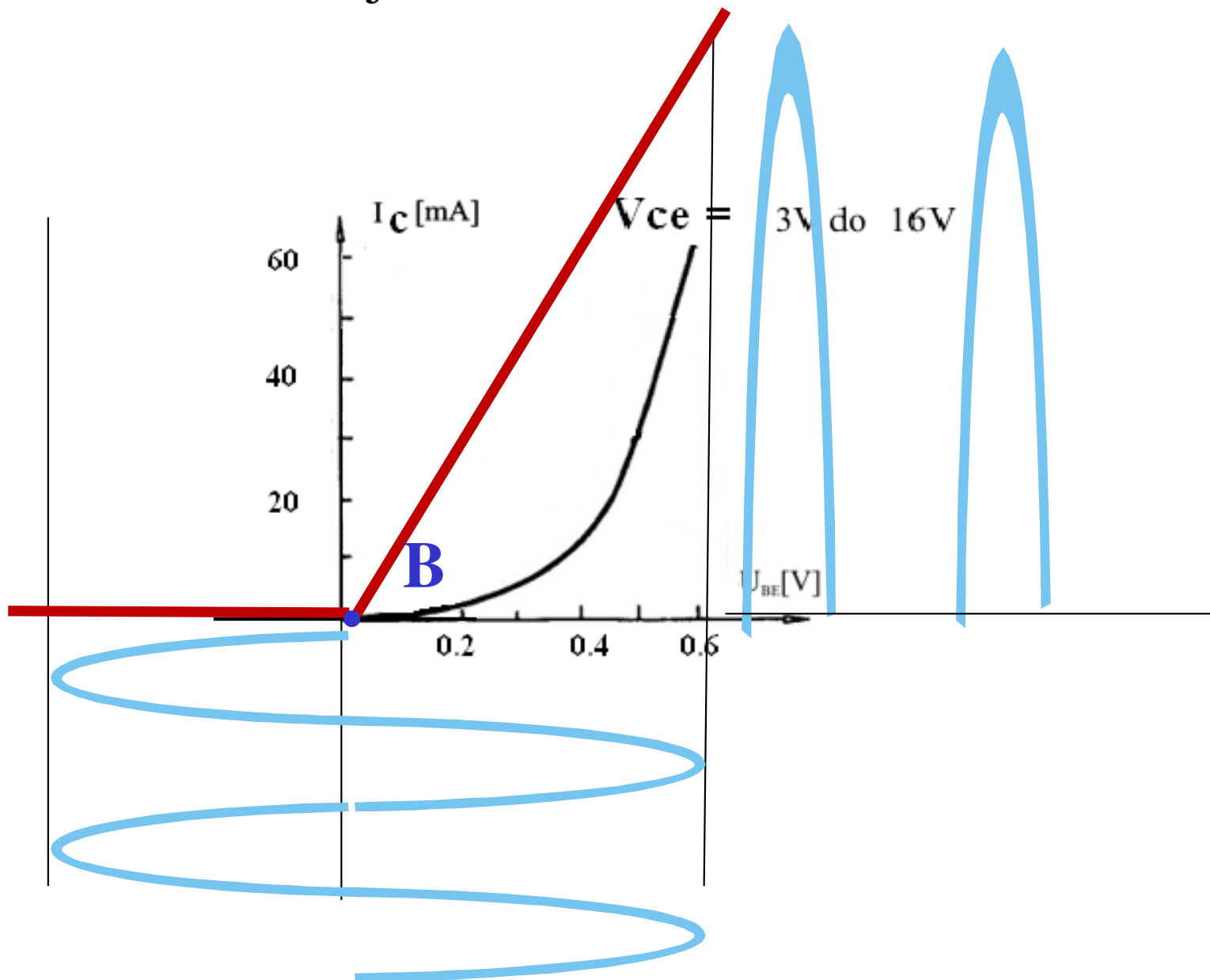
Maksimalna trenutna snaga disipacije dvostruko je veća od korisne snage. Potrebno je koristiti tranzistore sa velikom vrednošću maksimalne snage disipacije.

▪ Izrada pojačavača velikih snaga u klasi A zahteva skupe i komplikovane komponente za hladjenje. Zato se ovi pojačavači uglavnom kroste za relativno male snage do 1W.

## Pojačavači snage u klasi B

# POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA klasa B

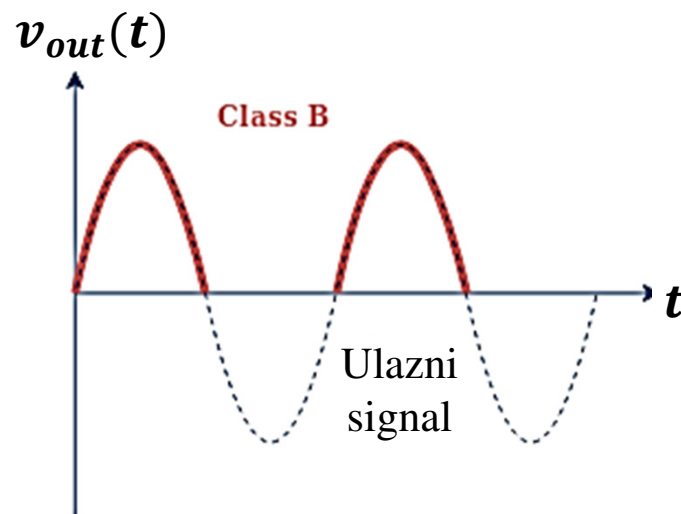
Položaj radne na prenosnoj karakteristici tranzistora je na granici između zakočenja i aktivne oblasti.



## Pojačavači snage u klasi B

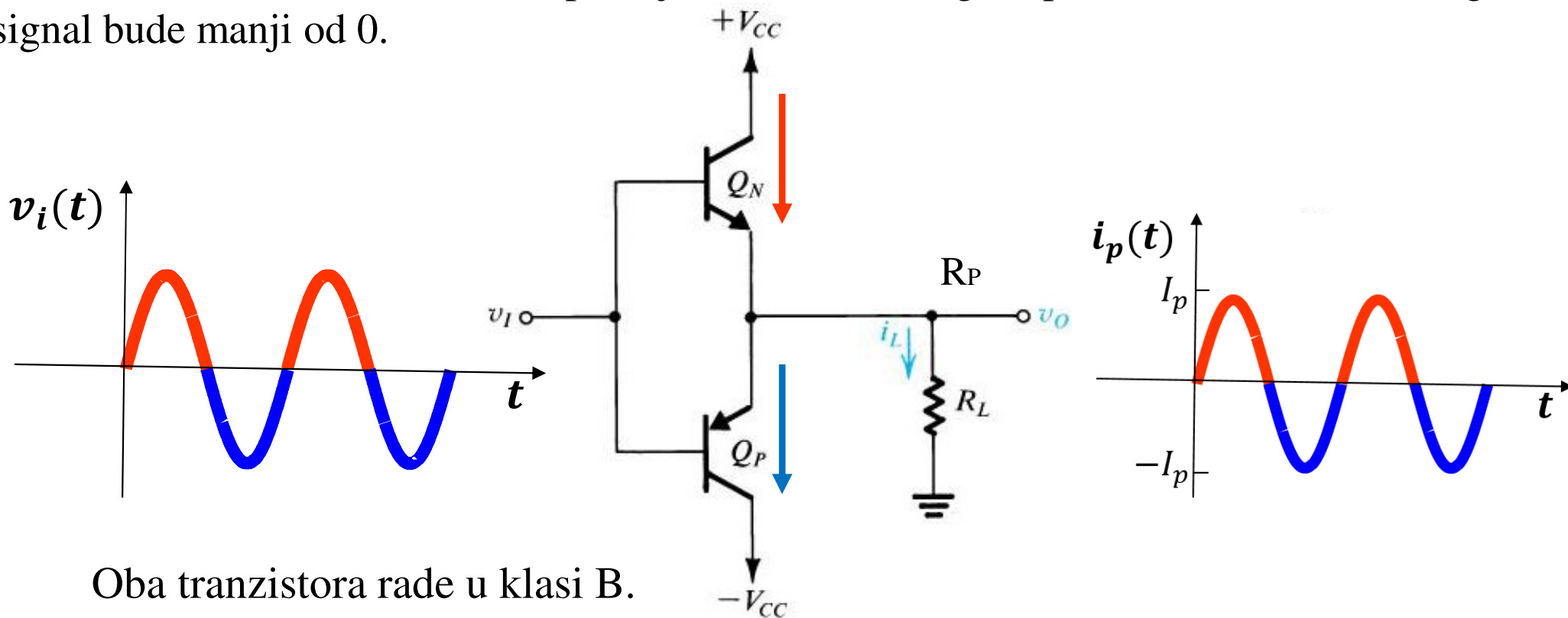
---

- Radna tačka aktivnog elementa nalazi se u tački gde prestaje da teče izlazna struja – granica zakočenja.
- Primenom samo jednog aktivnog elementa dolazi do velikih izobličenja izlaznih signala.
- Izlazni signal čini povorka pozitivnih ili negativnih impulsa sinusoidnog oblika



# Simetrična sprega sa komplementarnim parom u klasi B

U praksi se za izlazne stepene najviše koristi **simetrična sprega** ili **push pull (puš-pul) pojačavački stepen** sastavljen od dva tranzistora. Kod ovog pojačavačkog stepena potrošač se pobuđuje razlikom struja tranzistora. U odsustvu signala oba aktivna elementa su zakočena. Jedan aktivni element počinje da vodi čim signal postane veći od 0, a drugi čim signal bude manji od 0.



Oba tranzistora rade u klasi B.

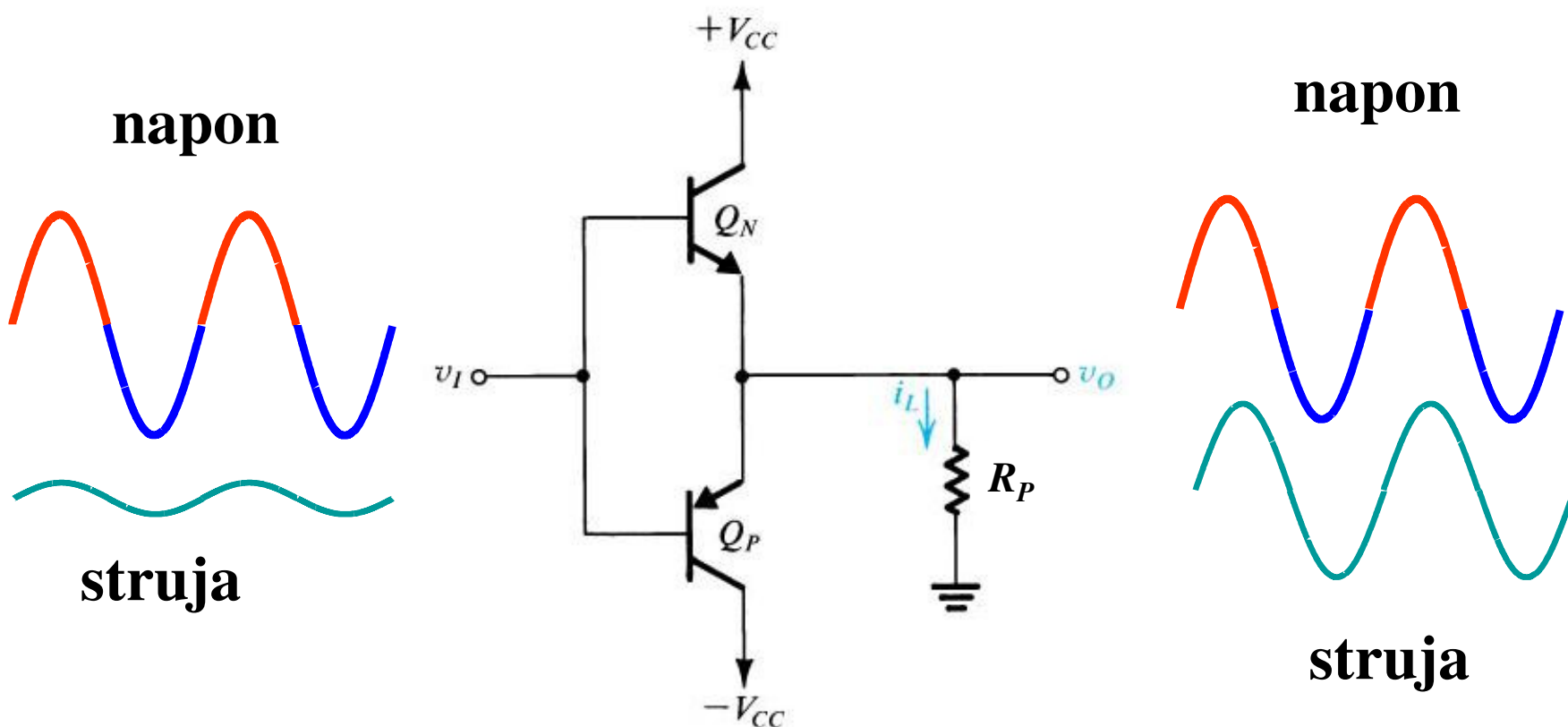
- Kada je signal pozitivan, vodi tranzistor  $Q_N$  (NPN tipa) i njegova izlazna struja teče preko otpornika  $R_p$ . Tranzistor  $Q_P$  (PNP tipa) je zakočen.
- Kada je signal negativan vodi tranzistor  $Q_P$  i obezbeđuje struju kroz potrošač dok je tranzistor  $Q_N$  zakočen.

Napon na  $R_p$  prati oblik ulaznog napona.

## Simetrična sprega sa komplementarnim parom u klasi B

Oba tranzistora su u konfiguraciji sa zajedničkim kolektorom. Odavde sledi da je naponsko pojačanje je manje od 1.

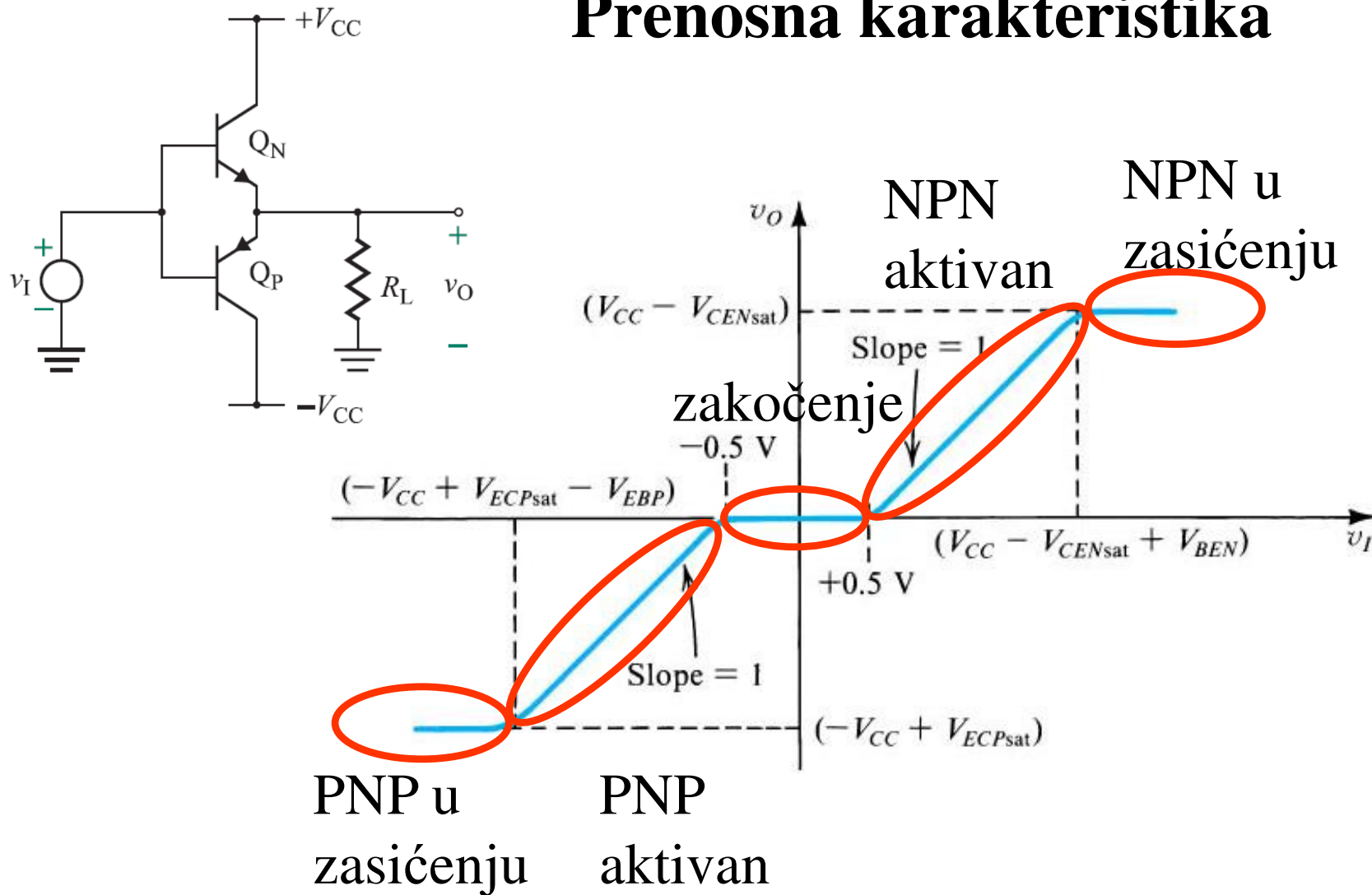
Struja je pojačana približno  $\beta$  puta jer je ulazna struja struja baze a izlazna struja emitora. Kada se uzme u obzir pojačanje napona i pojačanje struje dobija se da je snaga pojačana.





# Simetrična sprega sa komplementarnim parom u klasi B

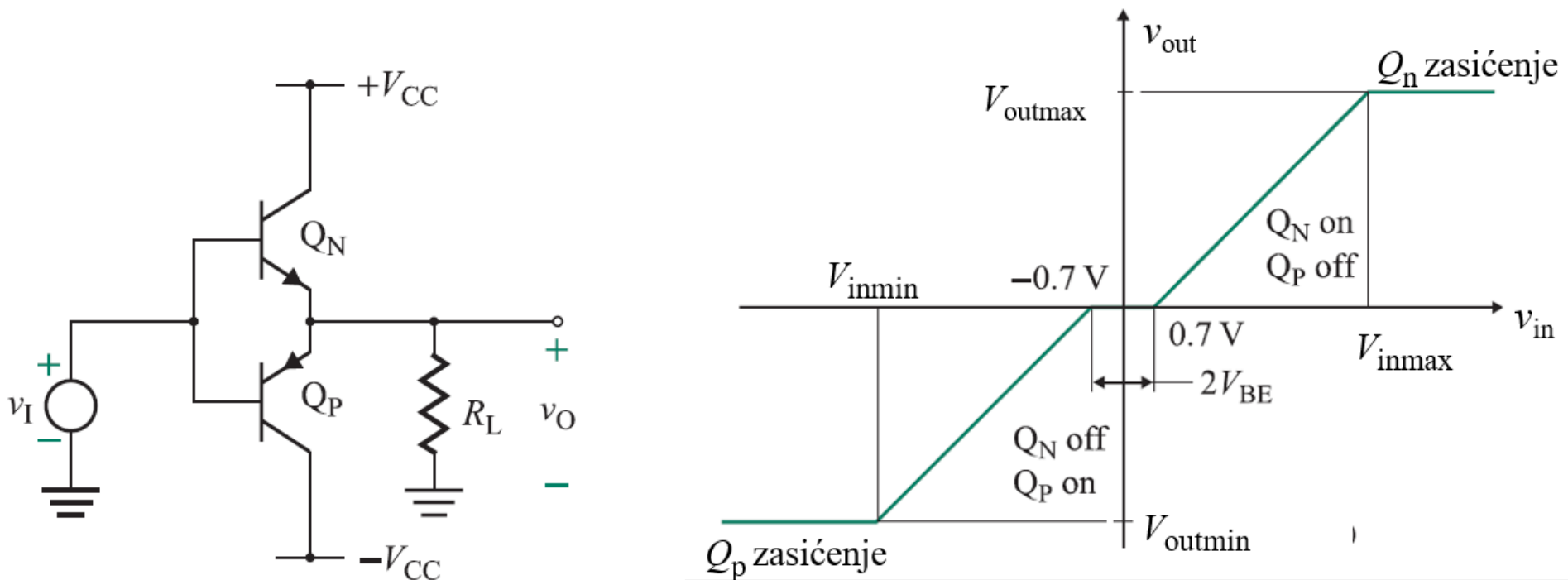
## Prenosna karakteristika



# Prenosna karakteristika push-pull pojačavača

S obzirom da su emitorski pn spojevi tranzistora vezani paralelno,  $v_{BE1} = v_{BE2}$  i prag provođenja npn tranzistora pozitivan (oko 0,6 V) a prag provođenja pnp tranzistora negativan (oko -0,6 V), nikada ne može da se desi da oba tranzistora vode istovremeno.

Kada je ulazni napon manji od praga provođenja tranzistora  $Q_N$ ,  $V_{\gamma n}$  tranzistor  $Q_N$  ne vodi. Isto tako, kada je ulazni napon veći od napona praga provođenja  $Q_P$ ,  $V_{\gamma p}$ , tranzistor  $Q_P$  ne vodi. Kada je ulazni napon u opsegu  $V_{\gamma p} < v_{in} < V_{\gamma n}$  oba tranzistora ne vode, ne teče struja kroz otpornik  $R_P$  i izlazni napon je nula.



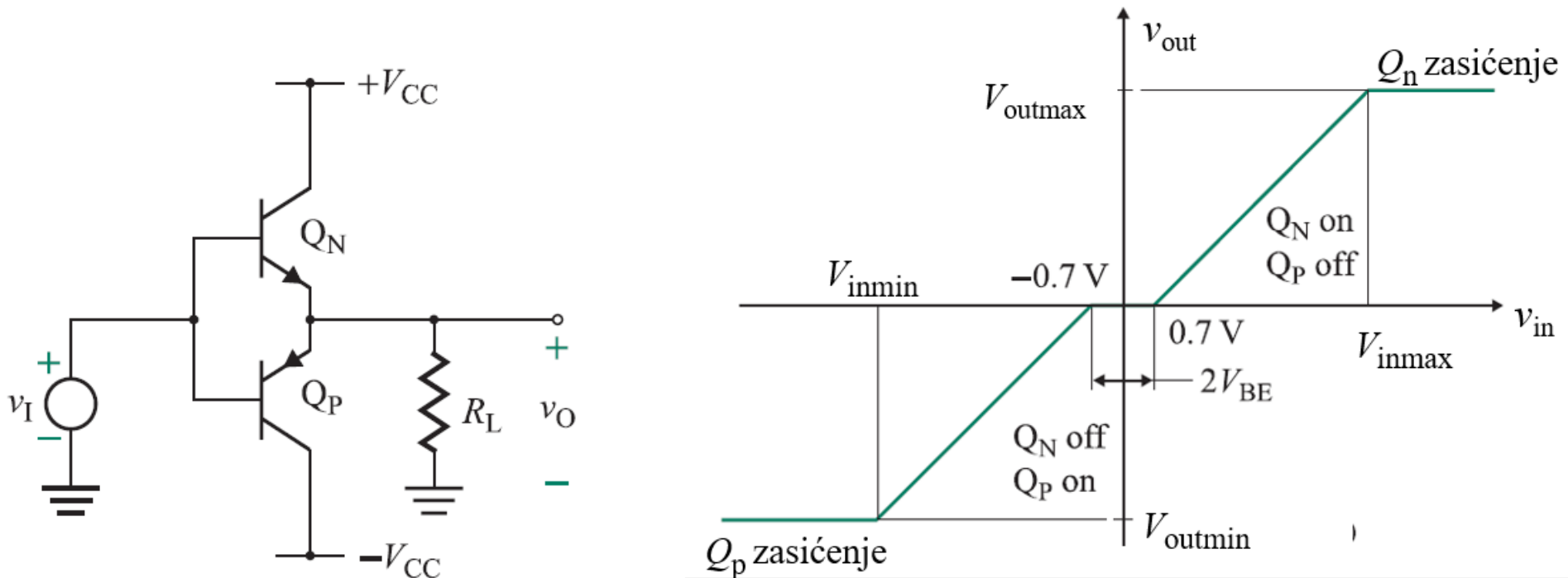
# Prenosna karakteristika push-pull pojačavača

Pri porastu ulaznog napona  $v_{in}$ , napon između kolektora i emitora  $V_{CEn}$  se smanjuje. Vrednost ulaznog napona pri kojoj je tranzistor  $Q_n$  na granici između zasićenja i aktivne oblasti rada odgovara situaciji kada napon  $V_{CEn}$  opadne na vrednost koja odgovara zasićenju  $V_{CESn}$ .

$$v_{inmax} = V_{CC} - V_{CESn} + V_{BE_n} \approx V_{CC} - 0,2 V + 0,7 V = V_{CC} + 0,5 V$$

Maksimalni napon na izlazu dobija se kada je tranzistor  $Q_n$  u zasićenju. S obzirom da je tada napon između kolektora i emitora  $V_{CESn}$  sledi da je napon na emitoru:

$$v_{outmax} = V_{CC} - V_{CESn} \approx V_{CC} - 0,2 V$$



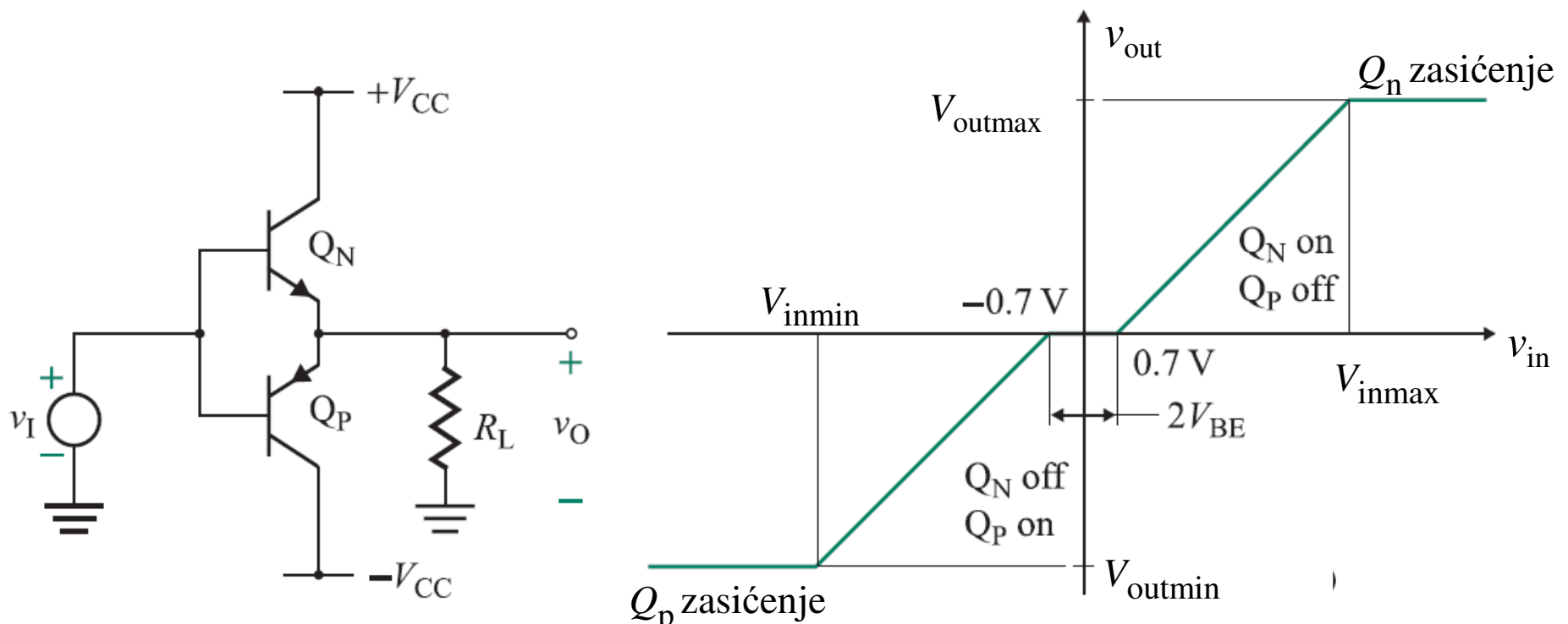
# Prenosna karakteristika push-pull pojačavača

Ukoliko je ulazni napon  $v_{in}$  negativan i povećava mu se amplituda napon između kolektora i emitora tranzistora  $Q_p$ ,  $V_{CEp}$  postaje sve manji po apsolutnoj vrednosti. Vrednost ulaznog napona pri kojoj je tranzistor  $Q_p$  na granici između aktivne oblasti rada i zasićenja nastaje kada se napon  $V_{CEp}$  izjednači sa vrednošću koja odgovara zasićenju  $V_{CESp}$ .

$$v_{inmin} = -V_{CC} - V_{CESp} + V_{BEp} \approx -V_{CC} + 0,2 V - 0,7 V = -V_{CC} - 0,5 V$$

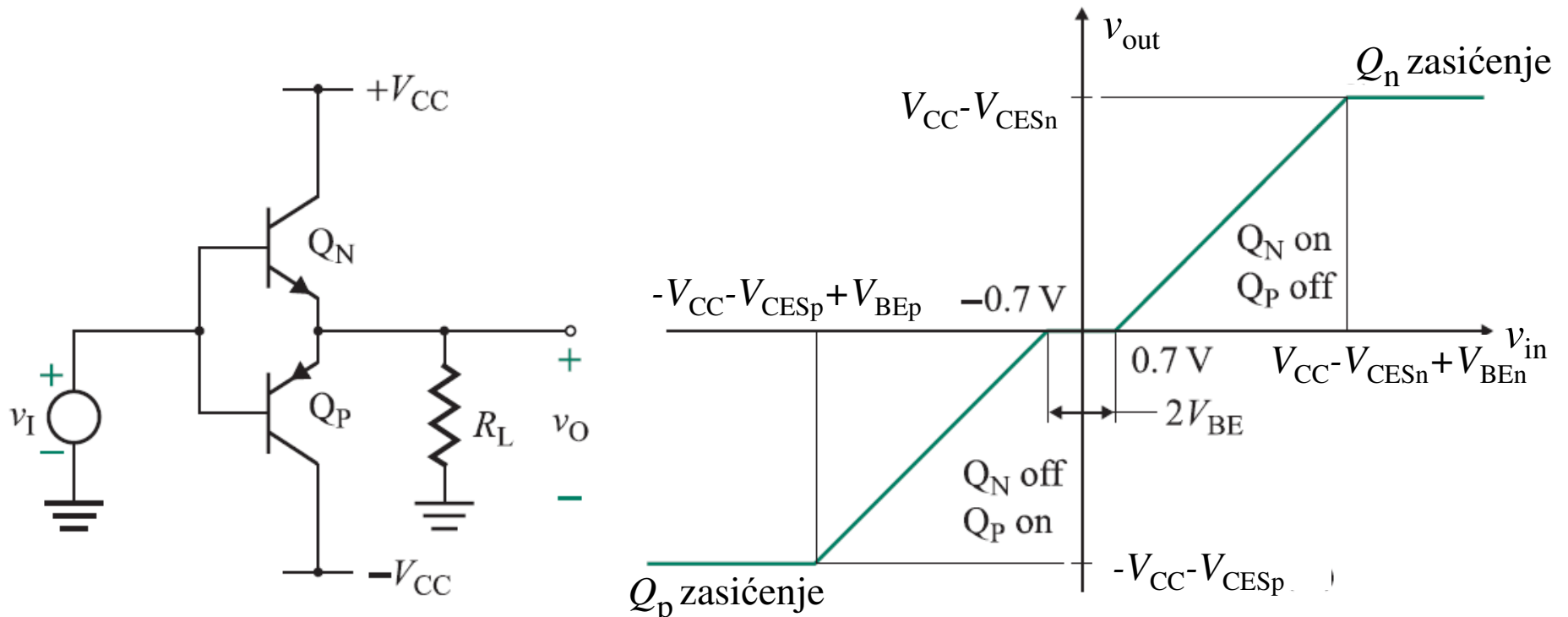
Minimalni napon na izlazu dobija se kada je tranzistor  $Q_p$  u zasićenju. S obzirom da je tada napon između kolektora i emitora  $V_{CESp}$  sledi da je napon na emitoru:

$$v_{outmin} = -V_{CC} - V_{CESp} \approx -V_{CC} + 0,2 V$$



$$v_{out} = \begin{cases} V_{outmax} & , v_{in} > V_{inmax} \quad (Q_n \text{ u zasićenju}) \\ v_{in} - V_{BE n} & , V_{\gamma n} \leq v_{in} \leq V_{inmax} \quad (Q_n \text{ u aktivnoj oblasti}) \\ 0 & , V_{\gamma p} \leq v_{in} \leq V_{\gamma n} \quad (Q_n \text{ i } Q_p \text{ u zakočenju}) \\ v_{in} - V_{BE p} & , V_{inmin} \leq v_{in} \leq V_{\gamma p} \quad (Q_p \text{ u aktivnoj oblasti}) \\ V_{outmin} & , v_{in} < V_{inmin} \quad (Q_p \text{ u zasićenju}) \end{cases}$$

$$v_{out} = \begin{cases} V_{CC} - V_{CESn} & , v_{in} > V_{CC} - V_{CESn} + V_{BE n} \\ v_{in} - V_{BE n} & , V_{\gamma n} < v_{in} < V_{CC} - V_{CESn} + V_{BE n} \\ 0 & , V_{\gamma p} < v_{in} < V_{\gamma n} \\ v_{in} - V_{BE p} & , -V_{CC} - V_{CESp} + V_{BE p} < v_{in} < V_{\gamma p} \\ -V_{CC} - V_{CESp} & , v_{in} < -V_{CC} - V_{CESp} + V_{BE p} \end{cases}$$



# Stepen iskorišćenja pojačavača u klasi B

Izračunavanje snage izvora napajanja  $P_{CC}$

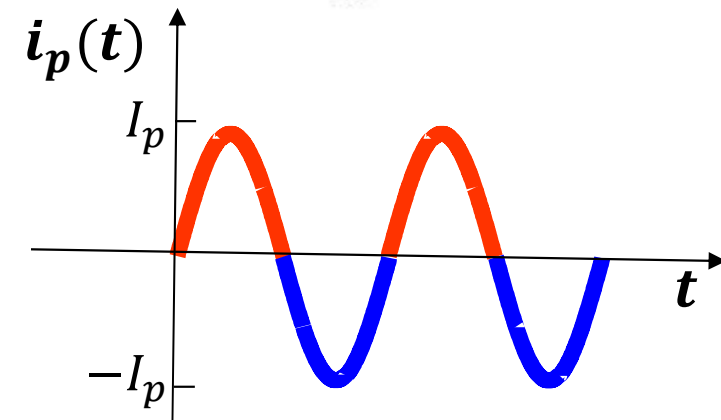
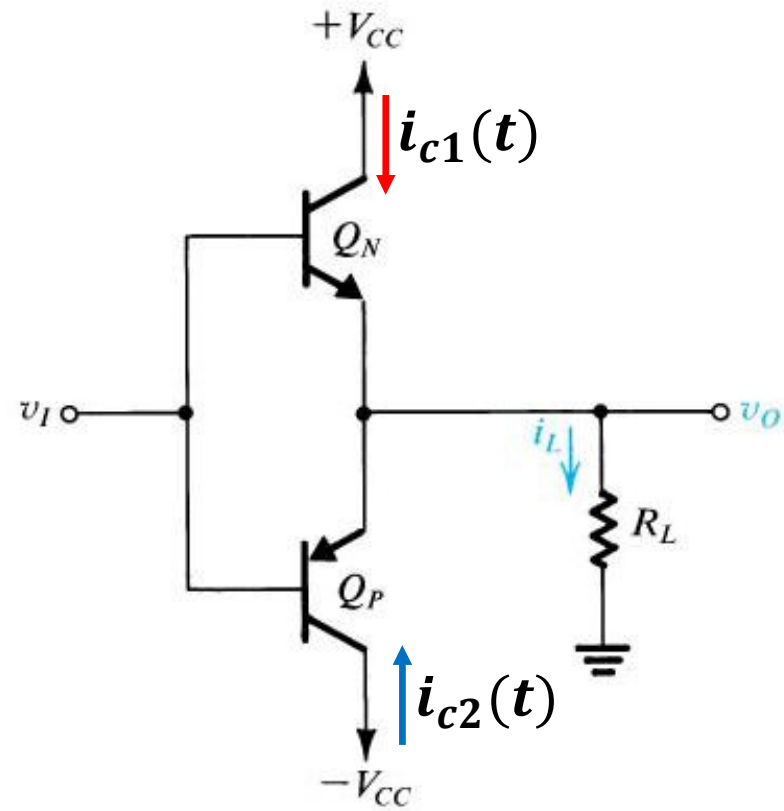
$$P_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T [V_{CC} \cdot i_{c1}(t) - V_{CC} \cdot i_{c2}(t)] dt$$
$$P_{CC} = \frac{V_{CC}}{T} \int_0^{T/2} I_p \sin(\omega t) dt - \frac{V_{CC}}{T} \int_{T/2}^T I_p \sin(\omega t) dt$$

$$\theta = \frac{2\pi \cdot t}{T}$$

$$P_{CC} = \frac{V_{CC} \cdot I_p}{2\pi} \left( \int_0^{\pi} \sin(\theta) d\theta - \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\theta) d\theta \right)$$

$$P_{CC} = \frac{V_{CC} \cdot I_p}{2\pi} \left( \cos(\theta) \Big|_{\pi}^{2\pi} - \cos(\theta) \Big|_0^{\pi} \right)$$

$$P_{CC} = V_{CC} \cdot I_p \cdot \frac{2}{\pi}$$



# Stepen iskorišćenja pojačavača u klasi B

Snaga izvora napajanja:

$$P_{CC} = I_{CC} \cdot V_{CC} = \frac{2 \cdot I_p \cdot V_{CC}}{\pi}$$

Napon i struja na otpornosti potrošača su približno sinusni tako da je korisna snaga:

$$P_K = \frac{I_p \cdot (I_p \cdot R_P)}{2} = \frac{I_p \cdot V_p}{2}$$

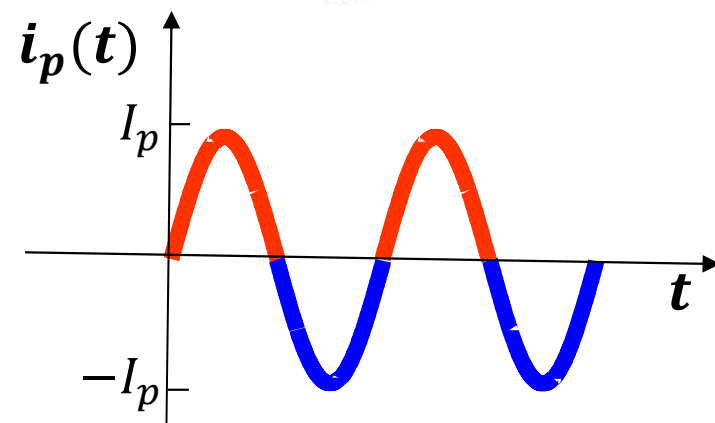
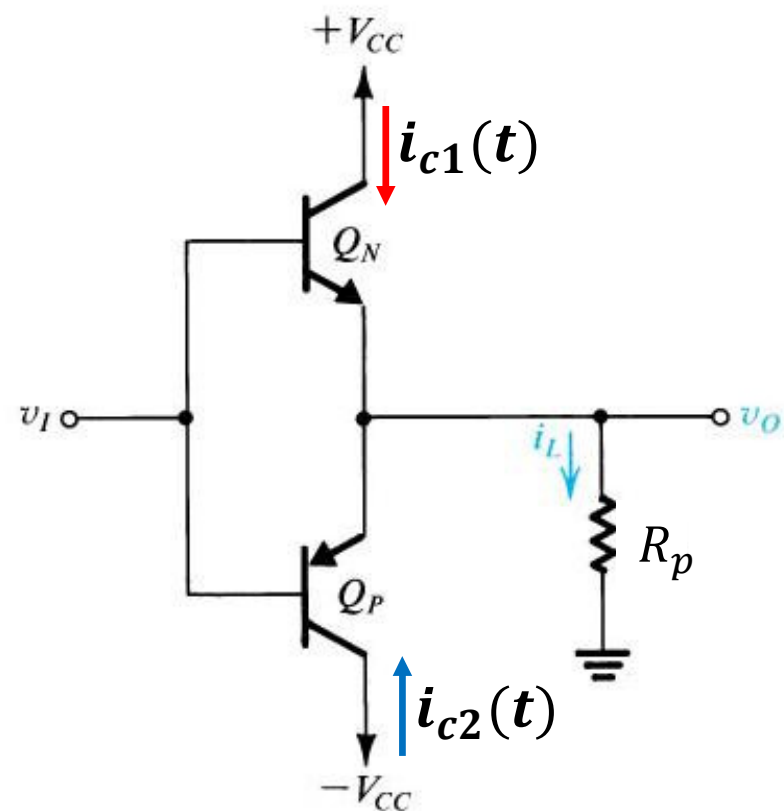
$V_P$  je amplituda napona na potrošaču.  $V_P \approx V_{CC}$

Stepen iskorišćenja je:

$$\eta = \frac{P_K}{P_{CC}} = \frac{\frac{I_p \cdot V_p}{2}}{\frac{2 \cdot I_p \cdot V_{CC}}{\pi}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_p}{V_{CC}}$$

$$\eta_{max} = \frac{P_{Kmax}}{P_{CC}} \approx \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC}}{V_{CC}} = \frac{\pi}{4} = 0,785$$

$$\eta_{max} = 78,5\%$$

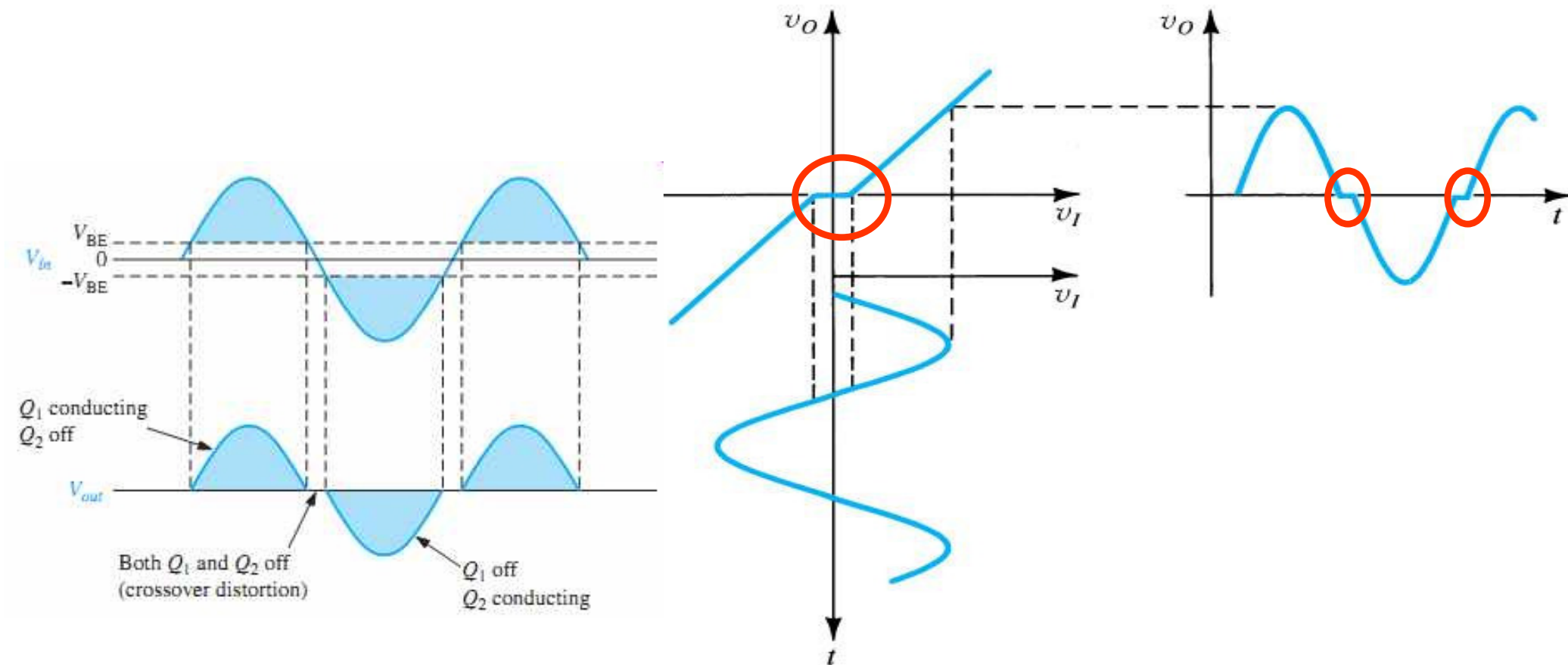


## Poređenje karakteristika pojačavača snage klase **A** i **B**

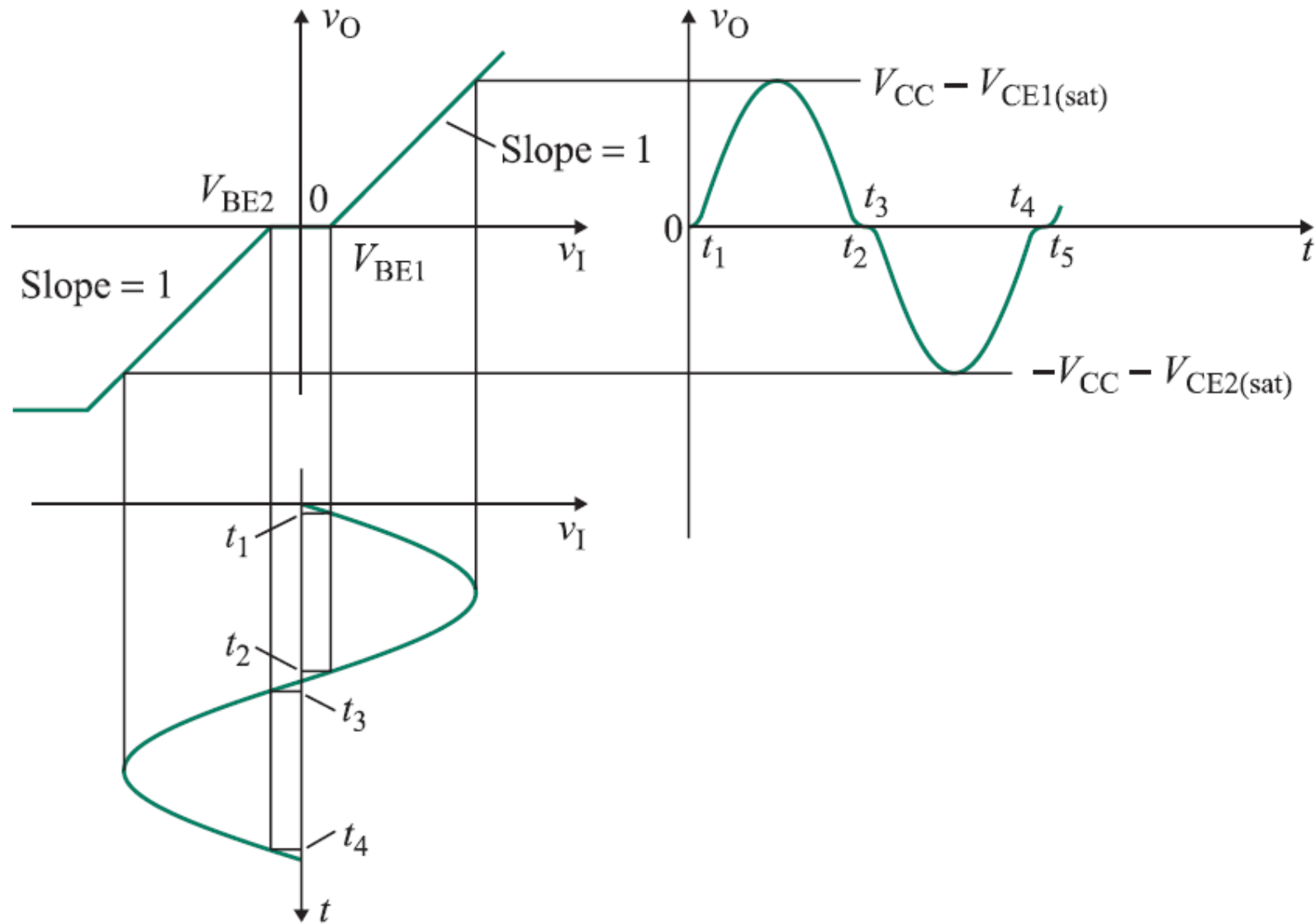
- ❑ Maksimalna vrednost stepena korisnog dejstva pojačavač u klasi B iznosi 78,5 %.
- ❑ Maksimalna disipacija na aktivnim elementima pojačavača u klasi B, 2,5 puta je manja od korisne snage. Pri istoj korisnoj snazi komponente koje se ugrađuju u pojačavač klase B, mogu da imaju pet puta manju snagu disipacije od onih koje se koriste u klasi A.
- ❑ Pojačavač u klasi B ima veća izobličenja od pojačavača u klasi **A**.
- ❑ Maksimalan napon inverzne polarizacije tranzistora u komplementarnoj sprezi iznosi približno  $2V_{CC}$ . Potrebno je obezbediti da napon proboja tranzistora bude veći od te vrednosti.



# Krossover izobličenja



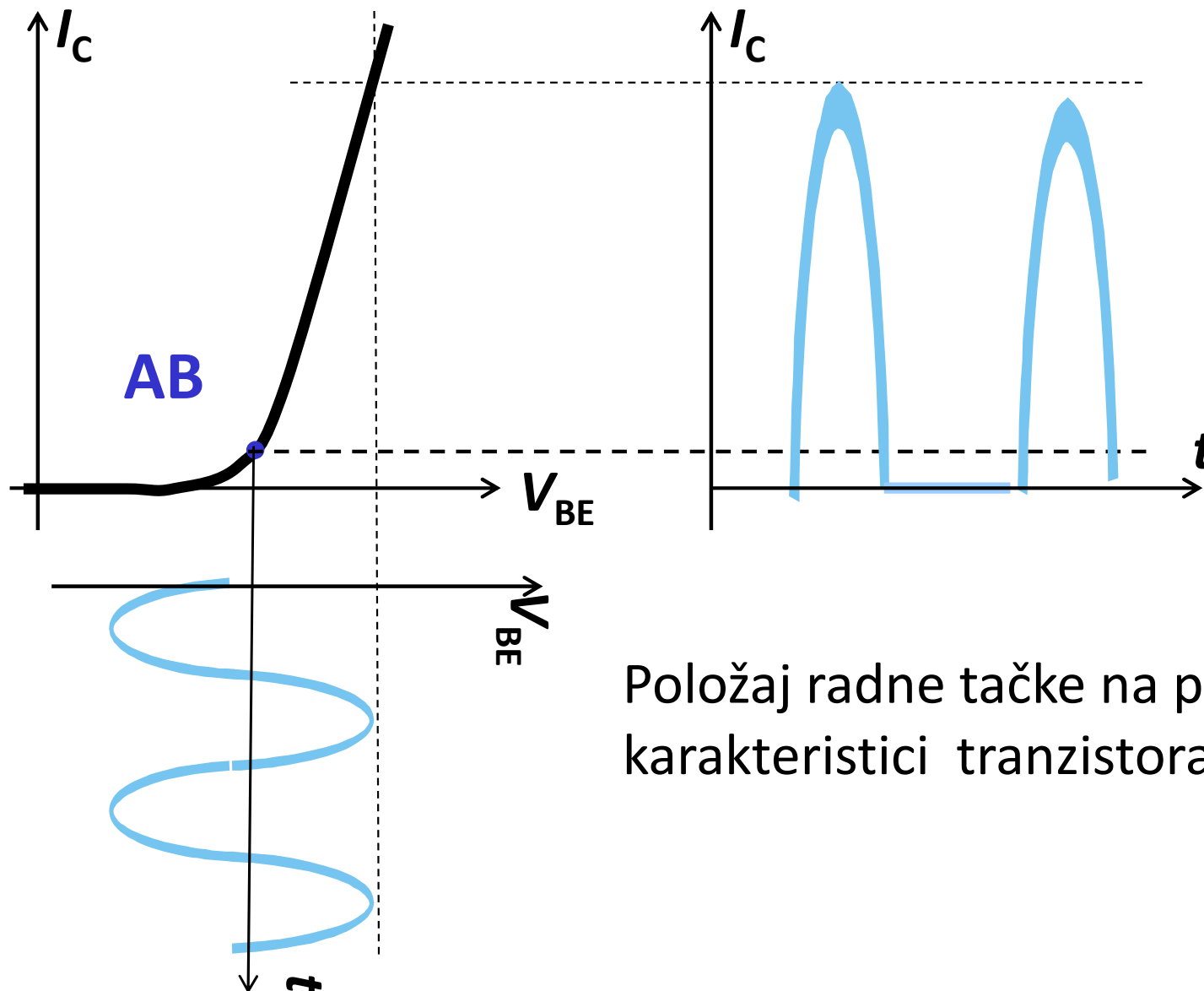
Pojava da je izlazni napon pušpul stepena jednak nuli pri malim vrednostima ulaznog napona  $V_{\gamma p} < v_{in} < V_{\gamma n}$  dovodi do izobličenja izlaznog napona koja se nazivaju **krossover izobličenja**. Prag provođenja pnp tranzistora je  $V_{\gamma p} \approx -0,5 V$ , dok je prag provođenja npn tranzistora  $V_{\gamma n} \approx 0,5 V$ .



# Pojačavači snage u klasi AB

## POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA klasa AB

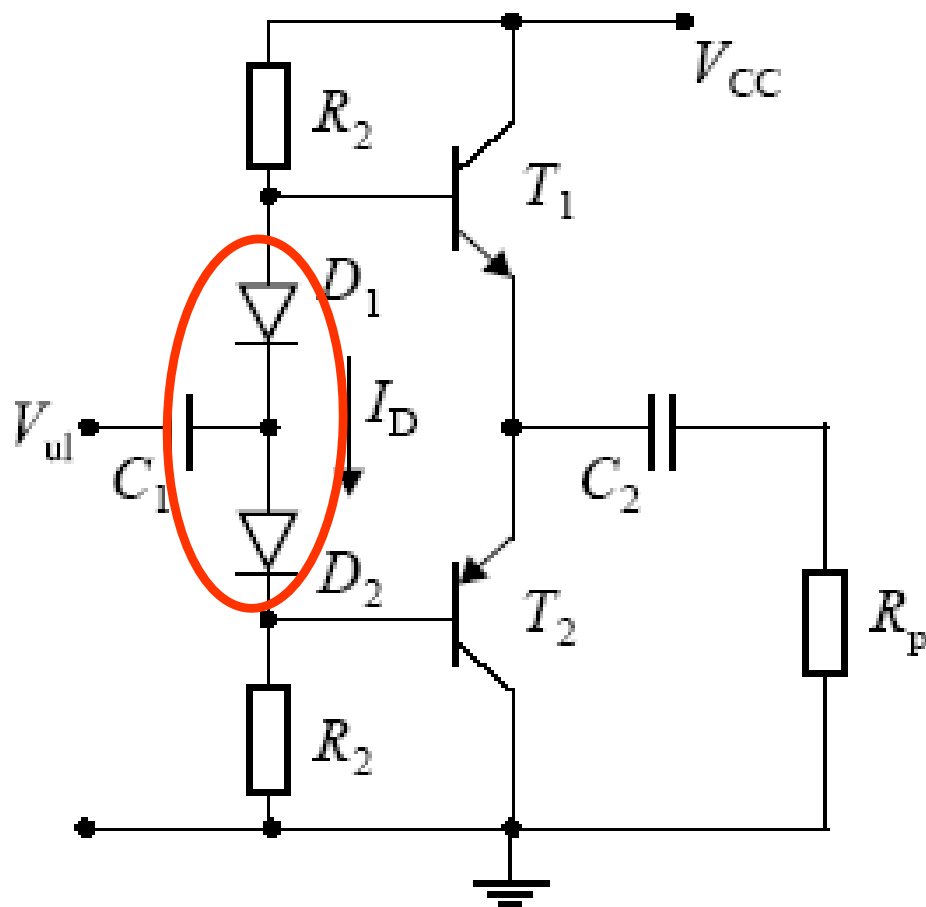
Radna tačka je u aktivnoj oblasti rada tranzistora ( $V_{BE} > V_\gamma$ ) ali je blizu oblasti zakočjenja.



Položaj radne tačke na prenosnoj karakteristici tranzistora

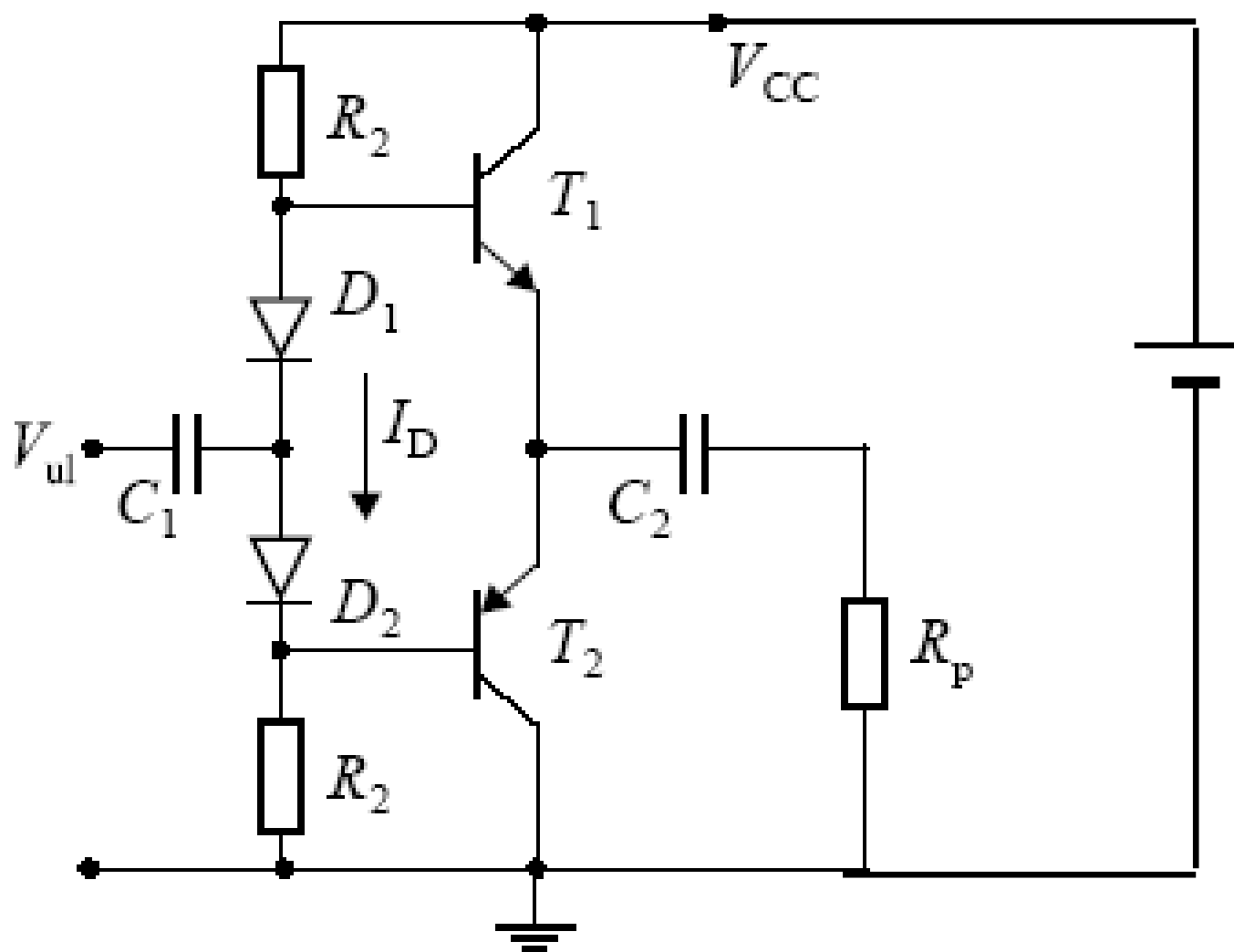
## Simetrična sprega sa komplementarnim parom u klasi AB

Vezivanjem dve direktno polarisane diode između baza NPN i PNP tranzistora svaki od tranzistora u **push-pull stepenu** polariše se da radi na ivici provođenja kada je pobudni napon ravan nuli. Na ovaj način eliminišu se **krossover izobličenja**. Praktično rečeno pri najmanjoj promeni ulaznog napona provešće jedna od dva tranzistora.

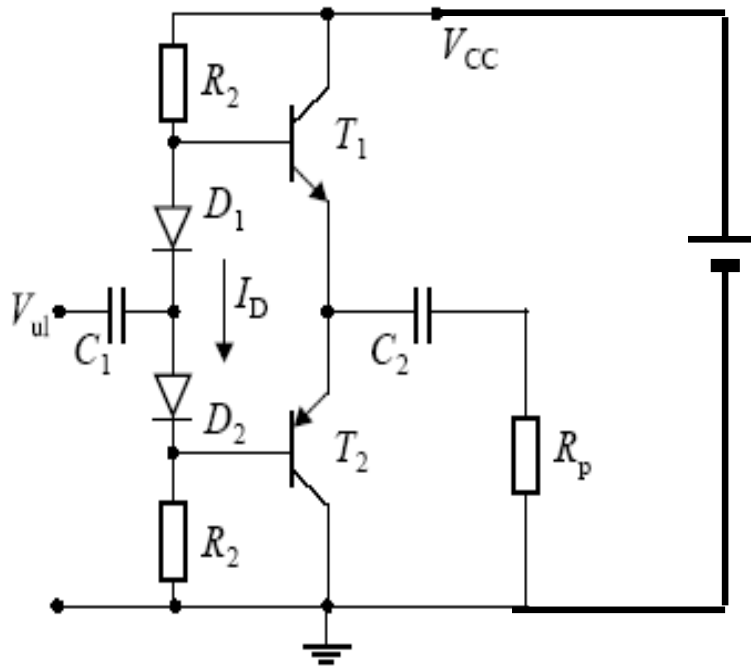


## Simetrična sprega sa komplementarnim parom u klasi AB

Kolo treba da bude polarisano na takav način da diode vode svo vreme. Treba obezbediti dovoljnu jednosmernu struju kroz diode, tako da one ostanu direktno polarisane i pri najvećim naizmeničnim strujama baza tranzistora.

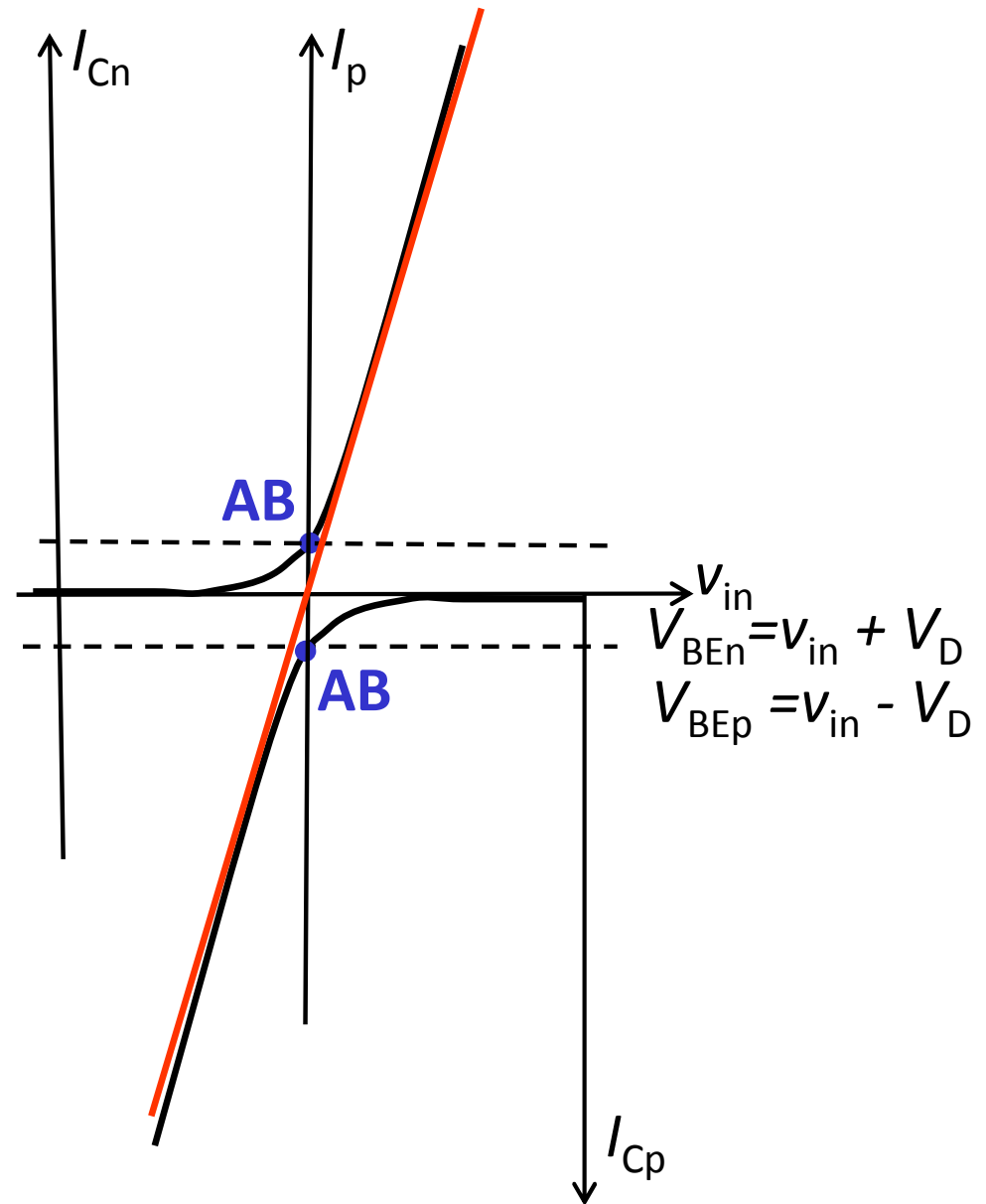


# POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA klasa AB



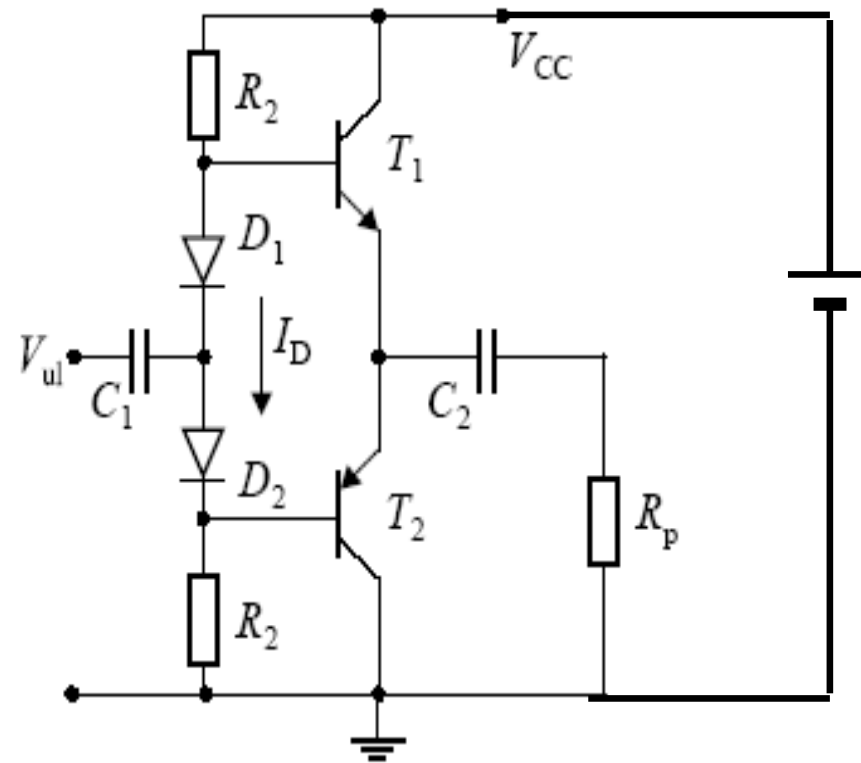
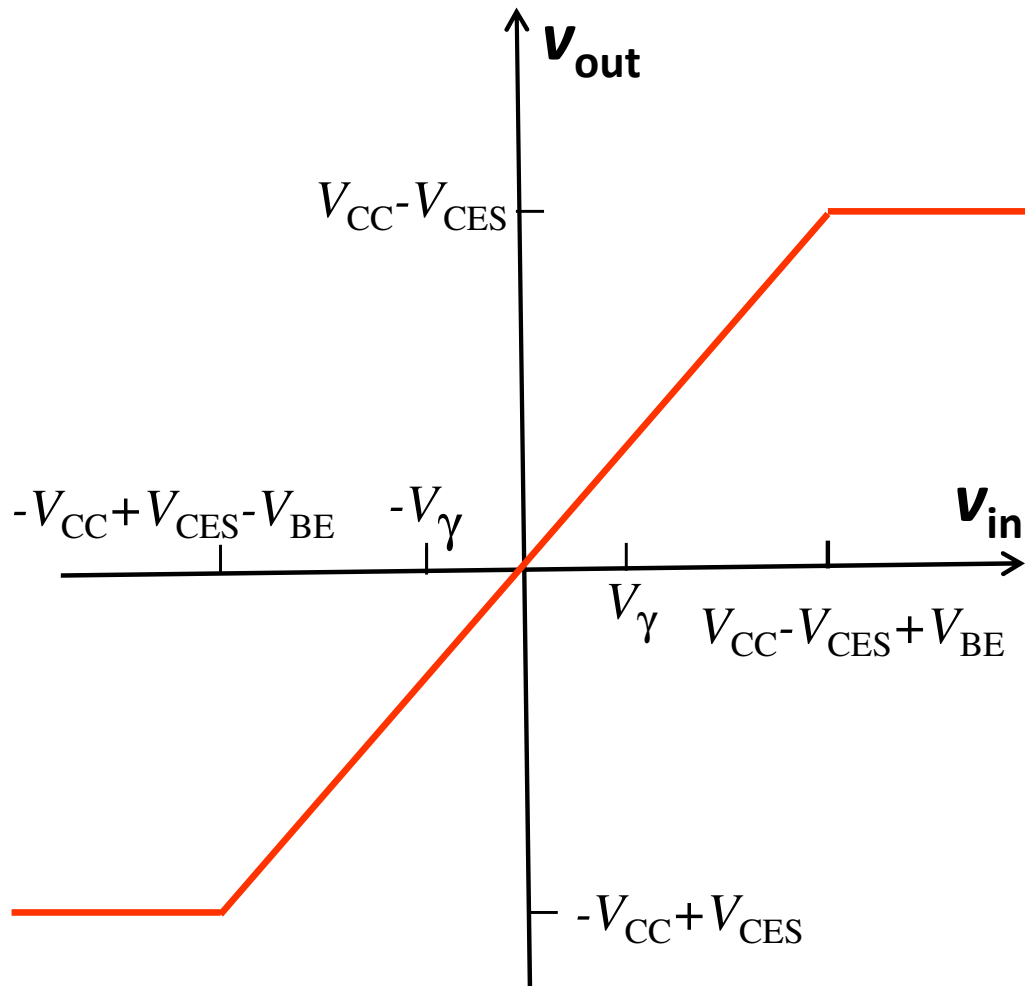
Za razliku od klase B u klasi AB pri manjim vrednostima ulaznog signala vode oba tranzistora pušpul stepena. Tom prilikom struje tranzistora se međusobno oduzimaju jer su suprotnog smera.

Na slici su nacrtane istovremeno prensone karakteristiek npn tranzistora T1 ( $I_{cn}$  u funkciji  $V_{ben}$ ), prenosna karakterisitika pnp tranzistora T2 ( $I_{cp}$  u funkciji  $V_{bep}$ ) i ukupna prenosna karakteristika ( $i_p$ ,  $v_{ul}$ ).



# POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA klasa AB

Prenosna karakteristika je linearna i prolazi kroz koordinatni početak. Kada se otklone krossover izobličenja pušpul stepen ima mnogo manja nelinearna izobličenja.



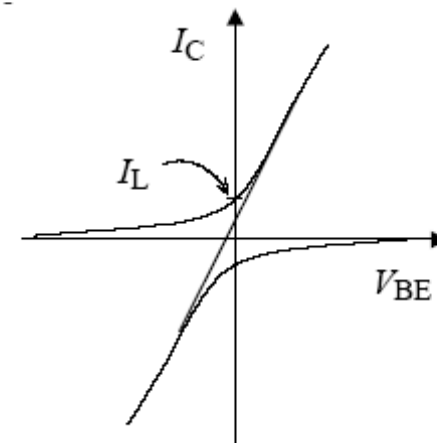


## POJAČAVAČI VELIKIH SIGNALA klasa AB

Klasa AB je po karakteristikama kompromis između klase A i klase B. Zahvaljujući svojim osobinama ovi pojačavači imaju široku primenu u audio pojačavačima.

U odnosu na pojačavač u klasi B, klasu AB karakteriše:

- Pojačavači u klasi AB ispoljavaju manja izobličenja u odnosu na klasu B. U klasi AB su eliminisana krossover izobličenja.
- Korisna snaga u klasi AB manja je nego u klasi B jer je redukovano dinamičko područje promene ulaznog, a time i izlaznog signala.
- Step en iskorišćenja u klasi AB manji je nego u klasi B, jer teče jednosmerna struja i u odsustvu ulaznog signala, tako da uvek postoji disipacija na tranzistoru.



## Pojačavači snage

### **Elementarna pitanja**

1. Osobine pojačavača u klasi A, B i AB. Poređenje ovih klasa sa stanovišta stepena korisnog dejstva i izobličenja.
2. Klasifikacija pojačavača snage, talasni oblik napona na izlazu i položaj radne tačke u izlaznoj karakteristici za klase A, B, C.
3. Nelinearna izobličenja, klir faktor.

### **Ostala ispitna pitanja**

4. Oblast bezbednog rada pojačavača.
5. Snaga disipacije, hiperbola disipacije, zavisnost maksimalne snage disipacije od temperature.
6. Električna šema pojačavača u klasi A, izbor radne tačke pojačavača u klasi A.
7. Stepenn korisnog dejstva pojačavač u klasi A (izvođenje izraza).
8. Simetrična sprega sa komplementarnim parom u klasi B (prenosna karakteristika, režimi rad tranzistora u pojedinim delovima karakteristike).
9. Simetrična sprega sa komplementarnim parom u klasi AB, umanjenje krossover izobličenja primenom dioda.
10. Stepenn korisnog dejstva pojačavač u klasi B (izvođenje izraza).