

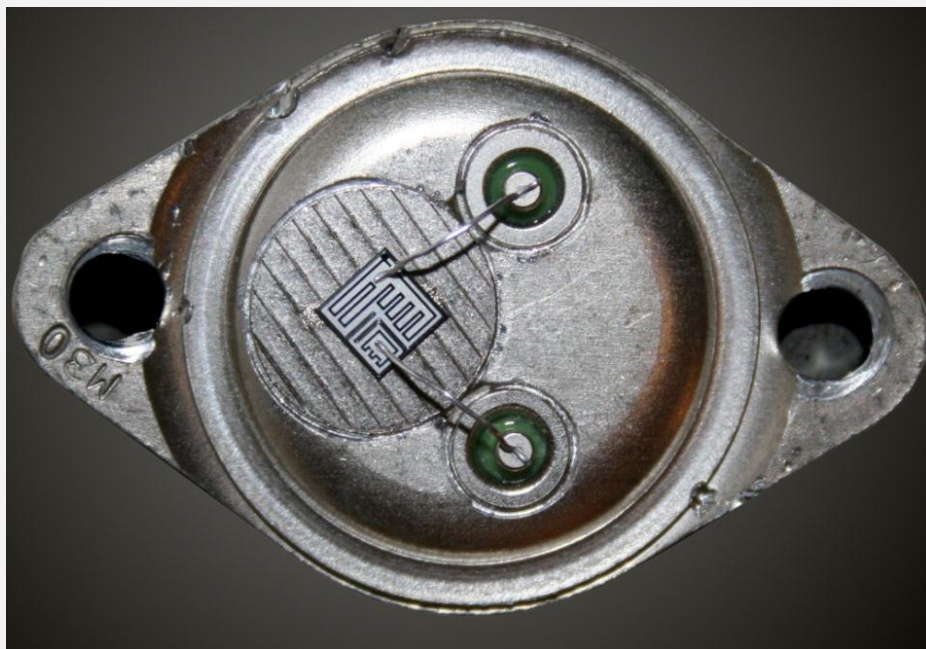
VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER,  
BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: master elektrotehničko inženjerstvo

PREDMET: PROJEKTOVANJE ELEKTROENERGETSKIH PRETVARAČA



# PREKIDAČKE KARAKTERISTIKE I POBUDNA KOLA BIPOLARNIH TRANZISTORA

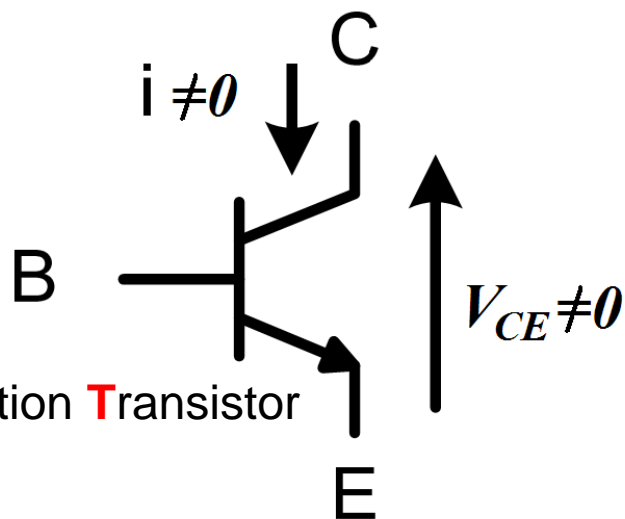


Predmetni profesor:  
Dr Željko Despotović

# BIPOLARNI TRANZISTOR

**BJT**

Engl. **B**ipolar **J**unction **T**ransistor



Tranzistor u  
aktivnom režimu

analogija

C  
kolektor



B - baza

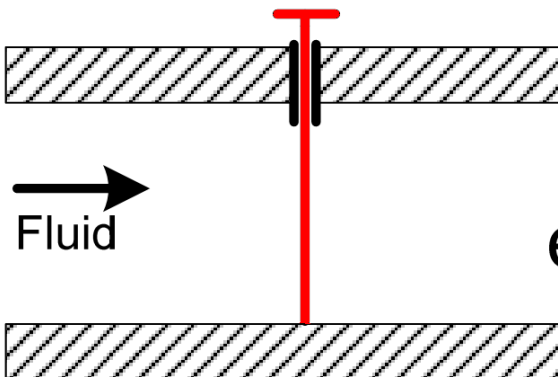
E  
emitor

Tranzistor zakočen  
(prekidač isključen)

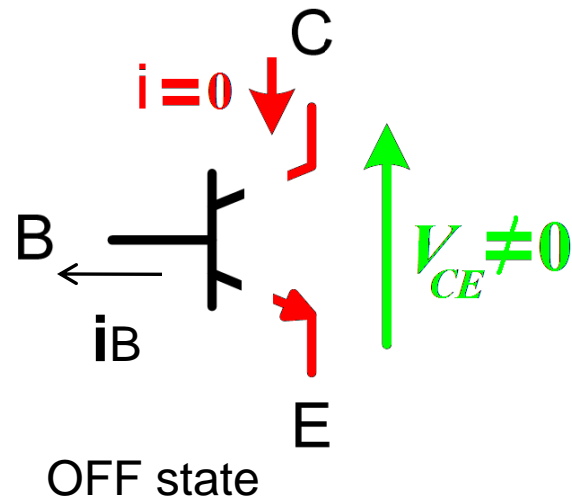
B - baza

analogija

C  
kolektor



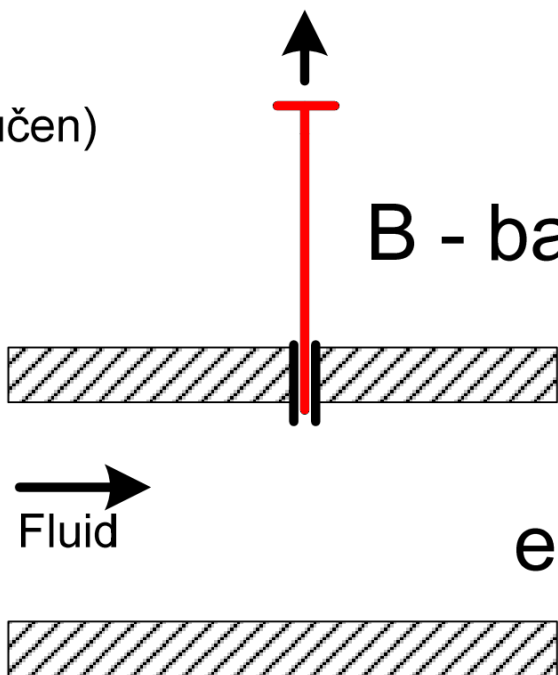
E  
emitor



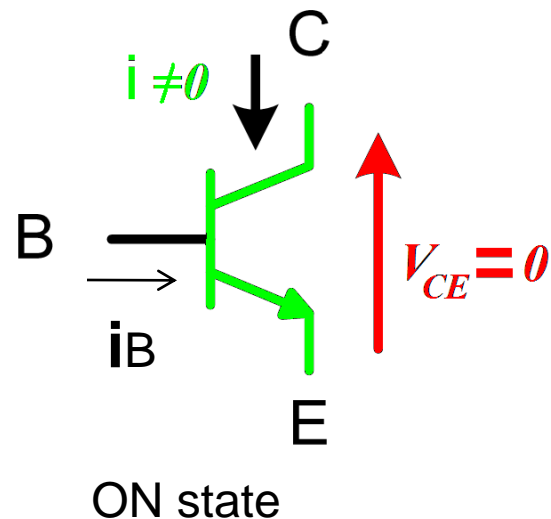
Tranzistor  
u zasićenju  
(prekidač uključen)

analogija

C  
kolektor



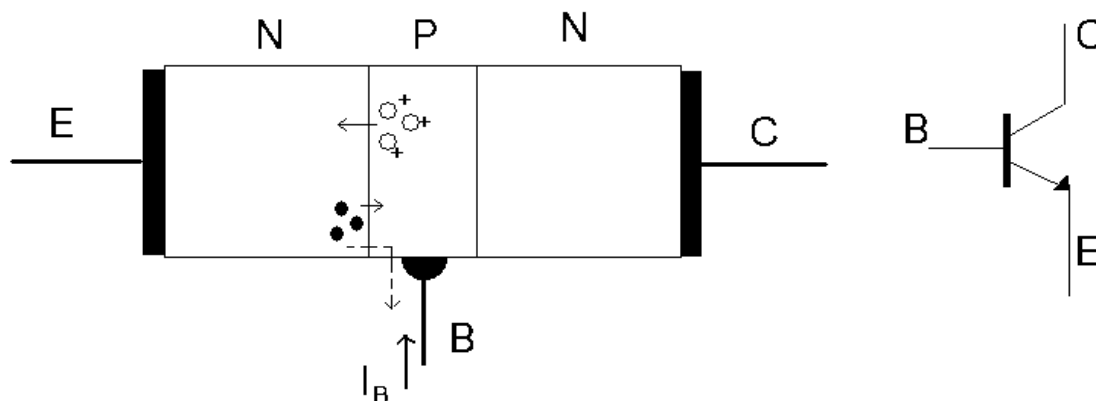
E  
emitor



## REALNOST!!!!

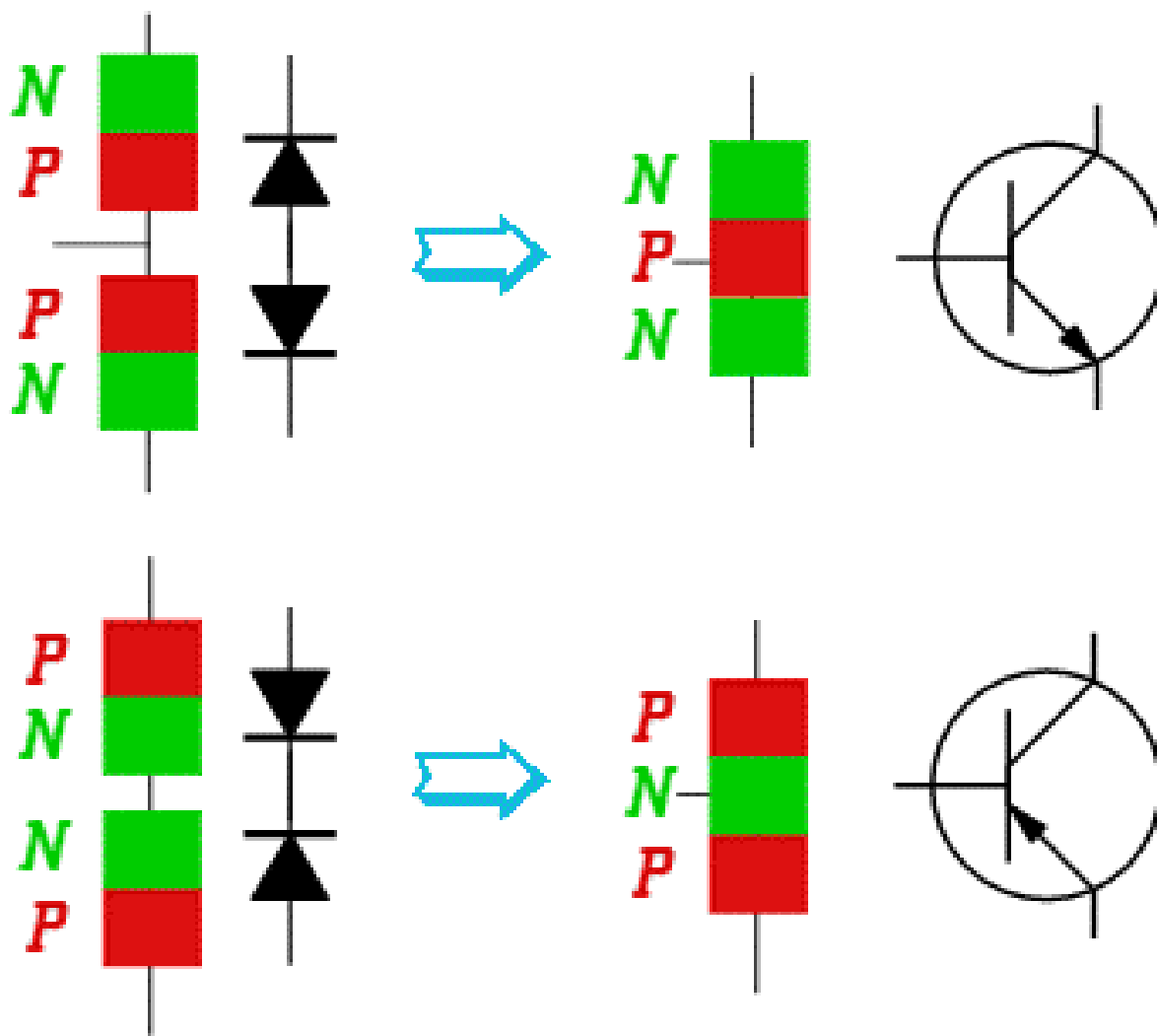
**Bipolarni tranzistor BJT (Bipolar Junction Transistor)** je poluprovodnička komponenta sa tri elektrode (baza-B, emitor-E i kolektor-C), koje su tim redosledom i serijski spojene.

Obzirom na vrste poluprovodnika od kojih su načinjene elektrode, u redosledu EBC delimo ih na NPN i PNP tranzistore.



Ova komponenta je sastavljena od tri različito dopirana sloja silicijuma Si. Pri normalnom radu tranzistora spoj EB propusno je polarisan, a spoj BC nepropusno. Tehnološki gledano, emitor je vrlo jako dopiran, baza nešto slabije, a kolektor dvojako: slabo u blizini BC spoja, a jače u blizini odvodne elektrode (kolektora). Rad BJT-a zasniva se na injekciji negativnih naelektrisanja iz emitora u bazu odnosno injekciji pozitivnih naelektrisanja iz baze u emitor

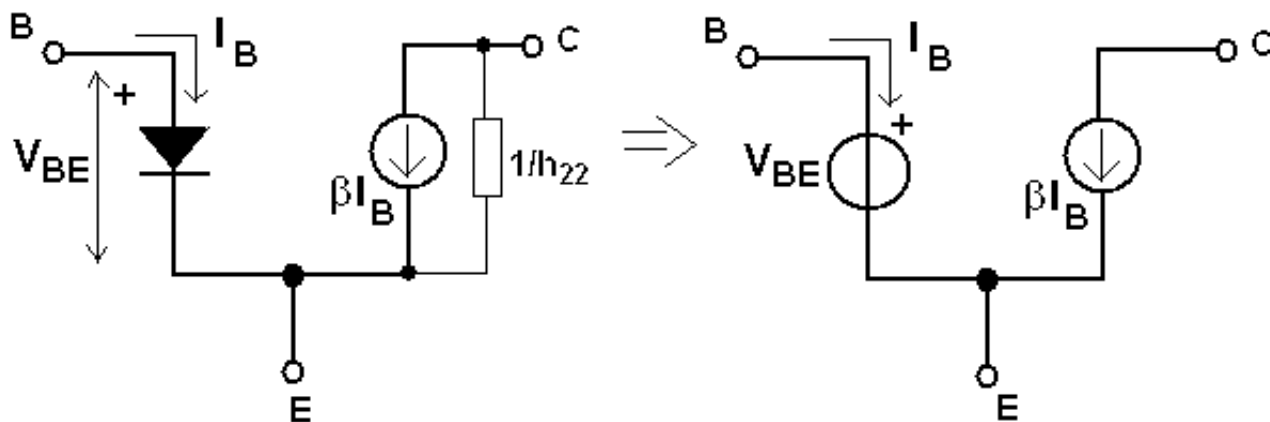
# ANALOGIJA BJT SA REDNIM P-N SPOJEVIMA



## AKTIVNI REŽIM

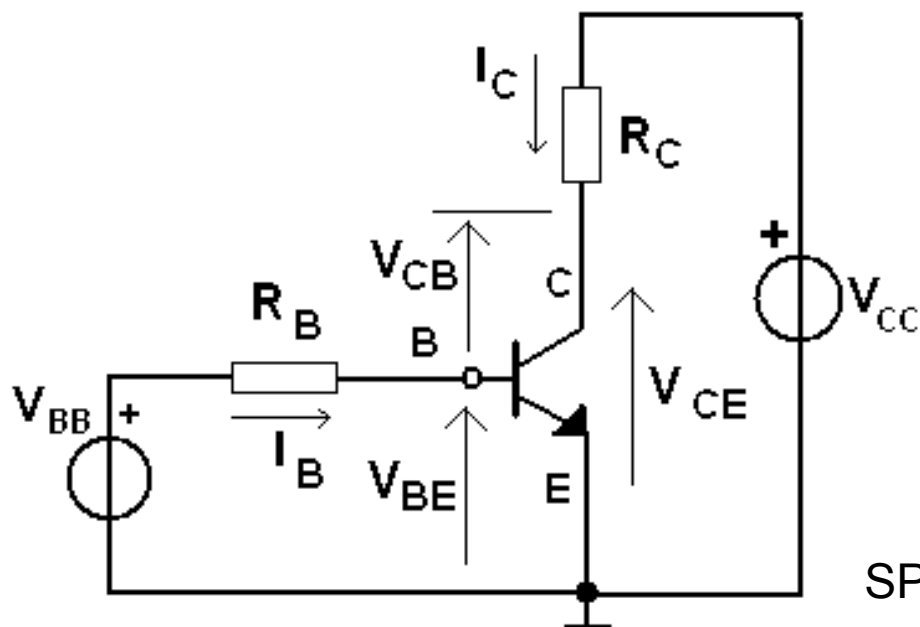
U aktivnom režimu rada spoj E-B je direktno polarisan. Većinski nosioci naelektrisanja (elektroni i šupljine) prolaze kroz E-B spoj. Elektroni se ubrizgavaju iz emitora u bazu, a šupljine iz baze u emitor. Elektroni ubrizgani u bazu postaju manjinski nosioci naelektrisanja i kreću se difuzijom do inverzno polarisanog spoja C-B gde ih električno polje usmerava ka kolektoru. U oblasti kolektora elektroni su opet većinski nosioci naelektrisanja. Elektroni rekombinovani u sloju baze bivaju nadoknađeni baznom strujom.

Stvarna struja baze ima dve komponente:  $I_B$  - struja baze generisana pomoću spoljnjeg kola i  $I_{CBO}$  - inverzna struja C-B spoja (zavisí jako od temperature). Na slici je data ekvivalentna šema BJT u aktivnom režimu (napon  $V_{BE} \approx 0.7V$ ).

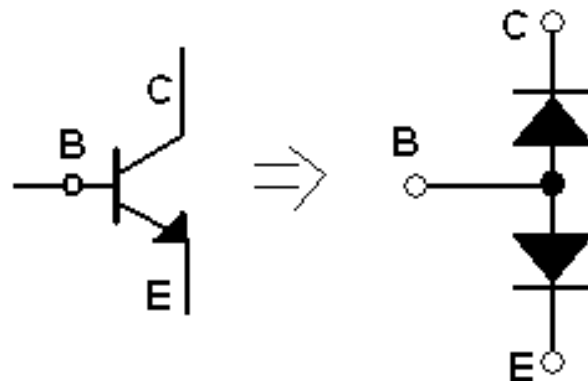


*Ekvivalentna šema za jednosmerni režim i uprošćena ekvivalentna šema za jednosmerni režim*

## OSNOVNI REŽIMI RADA TRANZISTORA



(a)



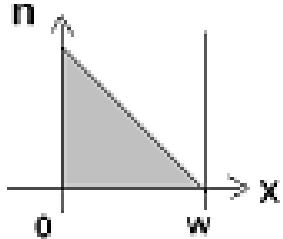
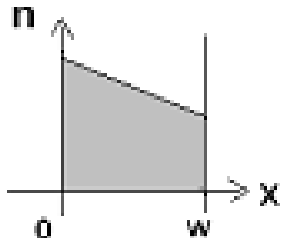
(b)

SPREGA SA ZAJEDNIČKIM EMITOROM

*Osnovno kolo sa BJT, (a)-električna šema , (b)-električni simbol i njegov diodni ekvivalent*

**Radna tačka u baznom kolu je određena strujom baze  $I_B$  i naponom  $V_{BB}$ . Struja baze je određena naponima  $V_{BB}$ , naponom spoja B-E  $V_{BE}$  i otporom u baznom kolu  $R_B$ . U kolektorskom kolu se nalazi otpornik  $R_C$ , koji se vezuje između kolektorskog priključka tranzistora i jednosmernog izvora napajanja  $V_{CC}$ . U električnoj šemi on predstavlja opterećenje.**

## Režimi rada BJT su određeni polarizacijama unutrašnjih P-N spojeva

REŽIM RADA	SPOJ E-B	SPOJ C-B	RASPODELA KONCENTRACIJE ELEKTRONA U SLOJUBAZE
AKTIVAN	DIREKTNO POLARISAN	INVERZNO POLARISAN	 <p>W-širina baze</p>
ZAKOČEN	INVERZNO POLARISAN	INVERZNO POLARISAN	
<b>ZASICEN</b>	<b>DIREKTNO POLARISAN</b>	<b>DIREKTNO POLARISAN</b>	
REVERZAN	INVERZNO POLARISAN	DIREKTNO POLARISAN	



U energetskim pretvaračima je od velikog značaja režim zasićenja tranzistora. U ovom režimu je struja baze toliko velika da su oba spoja direktno polarisana i u sloju baze postoji višak naelektrisanja!!!!

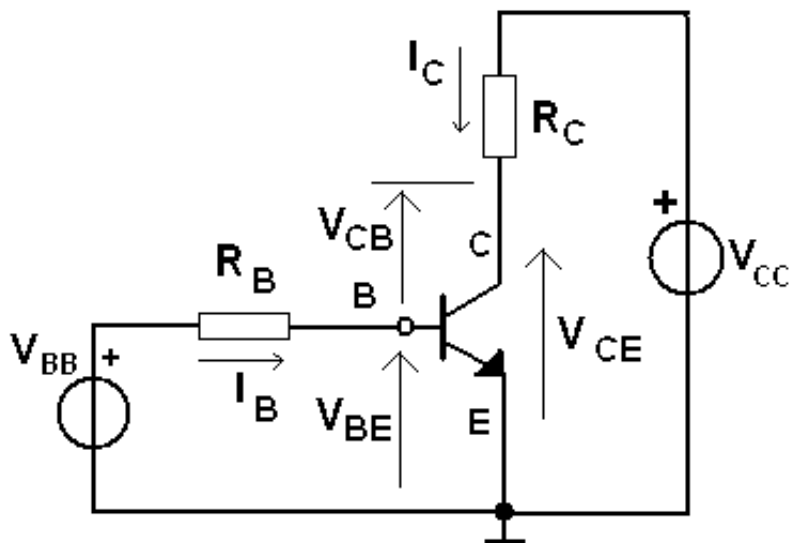
Pretpostavimo da se tranzistor nalazi u aktivnom režimu.

Dok je tranzistor u aktivnom režimu važi relacija:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

Pretpostavimo da je napon  $V_{BE} \approx 0.7V$ . Struja baze  $I_B$  tranzistora je određena jednačinom:

$$I_B = \frac{V_{BB} - 0.7V}{R_B}$$



Struja kolektora  $I_C$  je određena strujnim pojačanjem tranzistora  $\beta$  i strujom baze prema jednačini:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Sa porastom struje baze  $I_B$ , raste i struja kolektora  $I_C$ , tako da u jednom trenutku napon B-E postaje:

$$V_{BE} \geq V_{CC} - R_C I_C = V_{CC} - R_C \cdot \beta \cdot I_B$$

$$V_{CB} = -V_{BE} + V_{CE} \longrightarrow V_{CE} < V_{BE} \longrightarrow V_{CB} < 0$$

a to znači da je P-N spoj B-C postao direktno polarisan, odnosno da se tranzistor nalazi u zasićenju.

**U režimu reverznog rada** emiter i kolektor menjaju uloge. Strujno pojačanje u ovom režimu  $\beta_i$  je u mnogo manje od onog koje se ima u direktnom režimu, odnosno  $\beta_i \ll \beta$ . Obično je u ovom režimu rada  $\beta_i \approx 5$ . Takođe u ovom režimu pada probojni napon tranzistora na 7-8V.

Emitorska oblast je inače jako dopirana da bi koncentracija slobodnih elektrona u njoj bila veća, pa samim tim i ubrizgani broj elektrona pri direktnoj polarizaciji E-B spoja. Posledica toga je mali inverzni probojni napon E-B spoja.

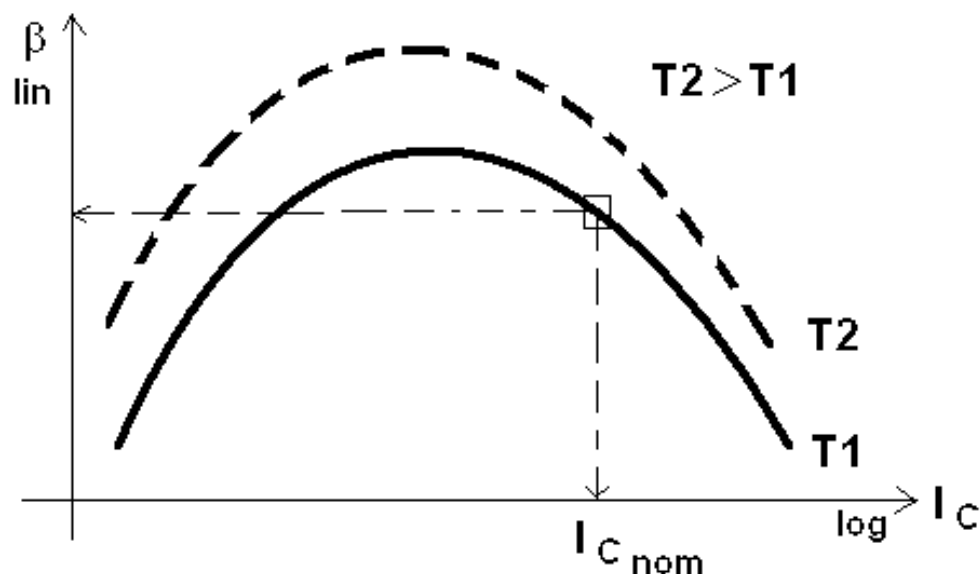
Kolektorska oblast je inače slabo dopirana, da bi pri inverznoj polarizaciji ispražnjena zona oko C-B spoja bila što deblja čime se postiže veći probojni napon. Posledica toga je da kolektorska zona mnogo manje ubrizgava elektrone u sloj baze, kada je spoj C-B direktno polarisan.

## STRUJNO POJAČANJE

Strujno pojačanje BJT u spoju sa zajedničkim emiterom se definiše kao odnos struje kolektora i struje baze :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

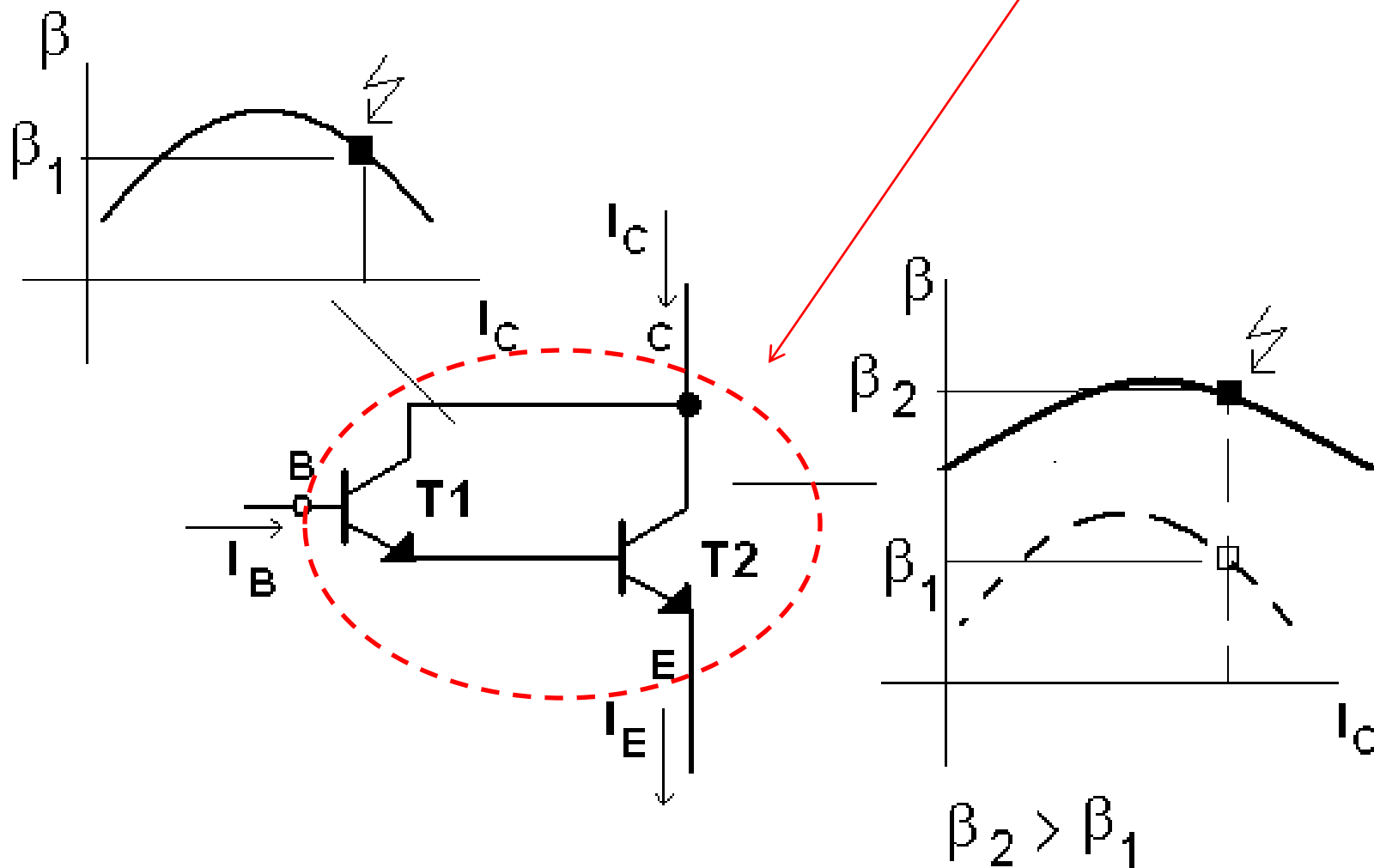
- Ovo pojačanje opada pri malim i veoma velikim strujama kolektora.
- Sa porastom temperature strujno pojačanje raste.
- Tipična karakteristika strujnog pojačanja za tranzistore snage je data na slici
- Obično je u katalozima proizvođača podela za  $\beta$  linearna, dok je podela za struju  $I_C$  logaritamska



*Zavisnost strujnog pojačanja od struje kolektora za dve različite temperature  $T_1$  i  $T_2$*

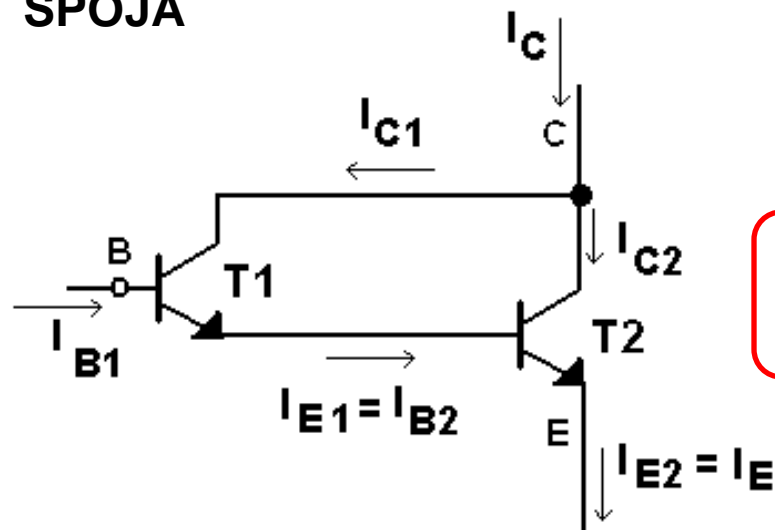
***Kako postići veće strujno pojačanje pri većim strujama?***

Jedan od načina je korišćenje tranzistora u tzv. Draining spoju



SLEDI ANALIZA!!!!

# ANALIZA POJAČANJA DARLINGTON SPOJA



$$\beta_1 = \frac{I_{C1}}{I_{B1}}$$

$$\beta_2 = \frac{I_{C2}}{I_{B2}}$$

$$I_{E1} = I_{C1} + I_{B1}$$

$$I_{E1} = \beta_1 I_{B1} + I_{B1} = (\beta_1 + 1) \cdot I_{B1}$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2}$$

$$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} \quad I_{E1} = I_{B2}$$

$$I_C = \beta_1 I_{B1} + \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{B1}$$

$$I_{C2} = \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{B1}$$

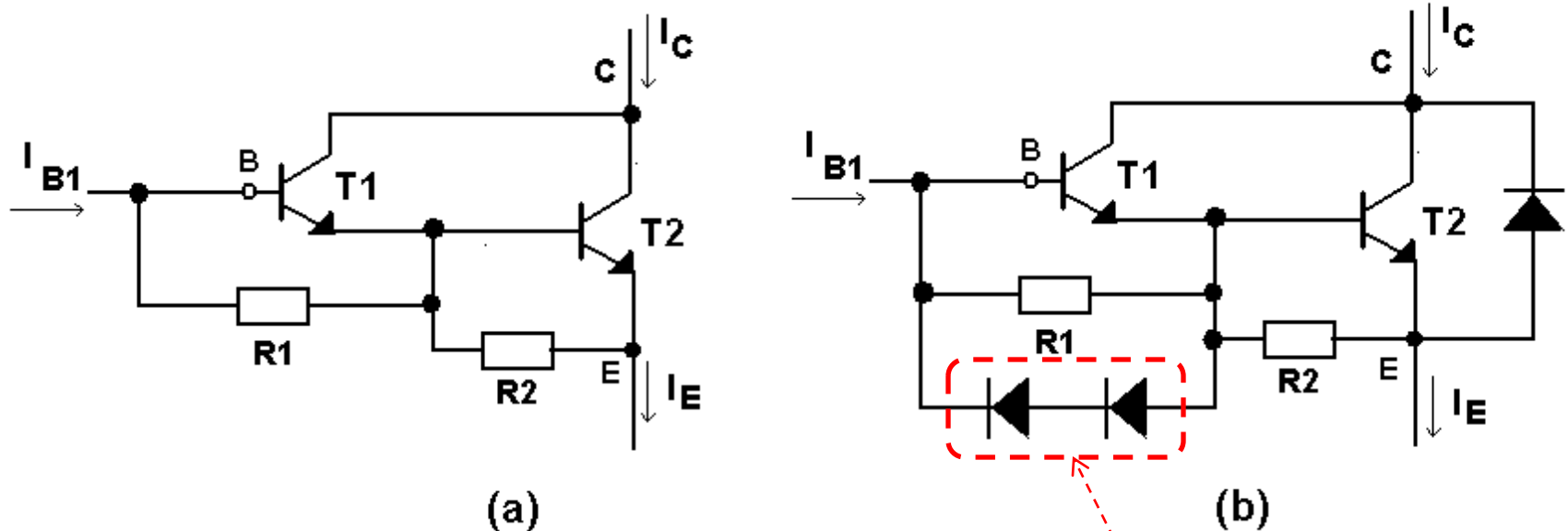
$$\beta_1 \gg 1 \quad I_C = (\beta_1 + \beta_2 \beta_1) I_{B1} = \beta_1 (\beta_2 + 1) I_{B1}$$

$$\beta_2 \gg 1$$

$$\beta_D = \frac{I_C}{I_{B1}} \approx \beta_1 \beta_2$$

REZULTUJUĆE POJAČNJE

Praktična realizacija Darlington spoja je nešto drugačija od prethodne predstave. U praksi se između spojeva B-E pripadajućih tranzistora T1 i T2, stavljaju otpori R1 i R2. Ovi otpori služe da se inverzne struje zasićenja kolektorskih spojeva zatvore kroz njih i pri tome generišu vrlo male napone.



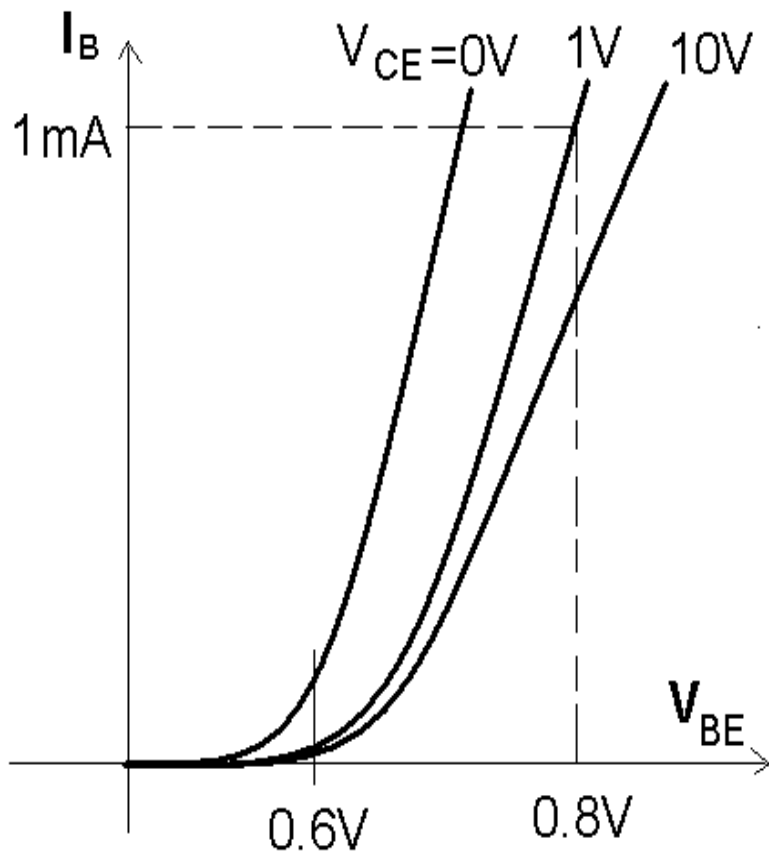
*Praktična realizacija Darlington sprege, (a)-otpori za zatvaranje struja “curenja”, (b)-ubrzanje gašenja.*

U realnim aplikacijama BJT u Darlington sprezi, tranzistor T2 se obično nalazi u dubokom zasićenju. Ovo značajno usporava njegovo isključenje. Za ubrzavanje isključenja T2, a stoga i celog Darlington spoja, se koriste tzv. **speed-up diode** koje se vezuju u emitorsko kolo tranzistora T1.

# Statičke karakteristike BJT

- Statičke karakteristike koje se koriste u praktičnim primenama su:
  - ulazna (karakteristika spoja B-E)
  - izlazna karakteristika, odnosno zavisnost struje kolektora od napona C-E (volt-amperska karakteristika)

# Ulazne karakteristike BJT



*Ulazna statička karakteristika BJT*

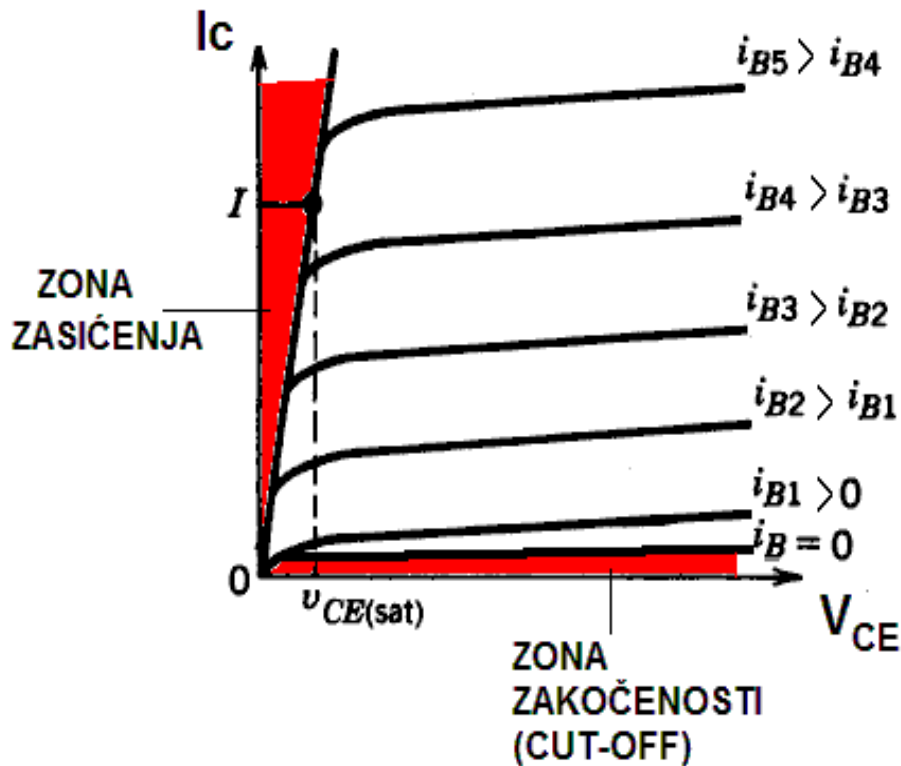
Ulazno kolo tranzistora (spoj B-E) je poluprovodnička dioda, pa su i statičke krive  $I_B = I_B(V_{BE})$  slične I-V krivama diode, ali je važan i uticaj parametra  $V_{CE}$

Za  $|V_{BE}| \gg |V_{CE}|$  spoj BC je propusno je polarisan, što znači da i kolektor injektira naelektrisanje u bazu, te time dobijamo velike struje baze  $I_B$  već i za male vrednosti  $V_{BE}$ .

Kada je  $|V_{BE}| \ll |V_{CE}|$  spoj B-C je polarisan nepropusno, te  $I_B = I_B(V_{BE})$  slabo zavisi od  $V_{CE}$ : smanjenjem  $I_B$  uz isti  $V_{BE}$  pri povećanom  $V_{CE}$  dovodi do suženja baze proširenjem područja osiromašnja spoja B-C, ali je taj učinak mali zbog slabog dopiranja kolektora uz spoj B-C.



# Izlazne karakteristike BJT



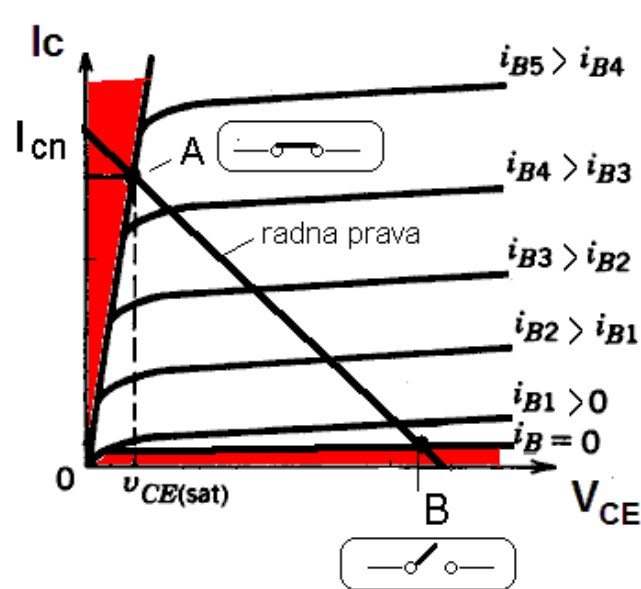
Izlazna karakteristika BJT tranzistora je ustvari zavisnost kolektorske struje  $I_C$  od napona spoja C-E, odnosno  $V_{CE}$  pri određenoj struji baze  $I_B$ .

Iz karakteristika  $I_C = I_C(V_{CE})$  koje su date na slici se zaključuje da je BJT kontrolisan strujom baze.

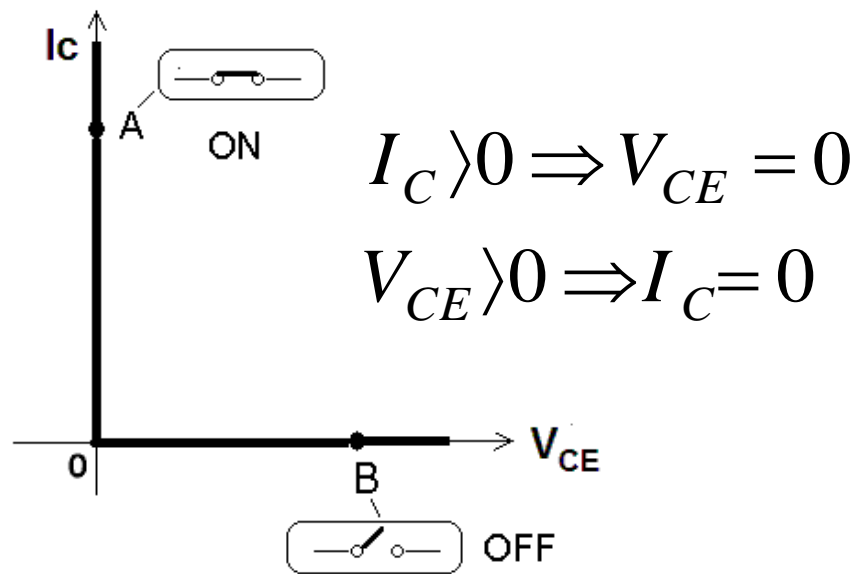
U radnoj I-V oblasti se uočavaju tri zone. Zona zasićenja, zona zakočenosti (blokiranja) i zona aktivnog režima rada.

Zona zasićenja BJT koja se karakteriše značajnim strujama  $I_C$  i malim naponom  $v_{CE(sat)}$ . Zona blokiranja BJT (cut-off) se ima kada je struja baze  $i_B = 0$ . U ovoj zoni se imaju na BJT značajni naponi  $V_{CE}$  i kroz njih teče veoma mala struja  $I_C$ , koja predstavlja inverznu struju zasićenja kolektorskog spoja  $I_C(i_B = 0) = I_{CBO}$ .

BJT najčešće koristi u energetskim pretvaračima kao prekidački element, tako da mu se radna tačka nalazi u jednoj od ove dve zone



(a)



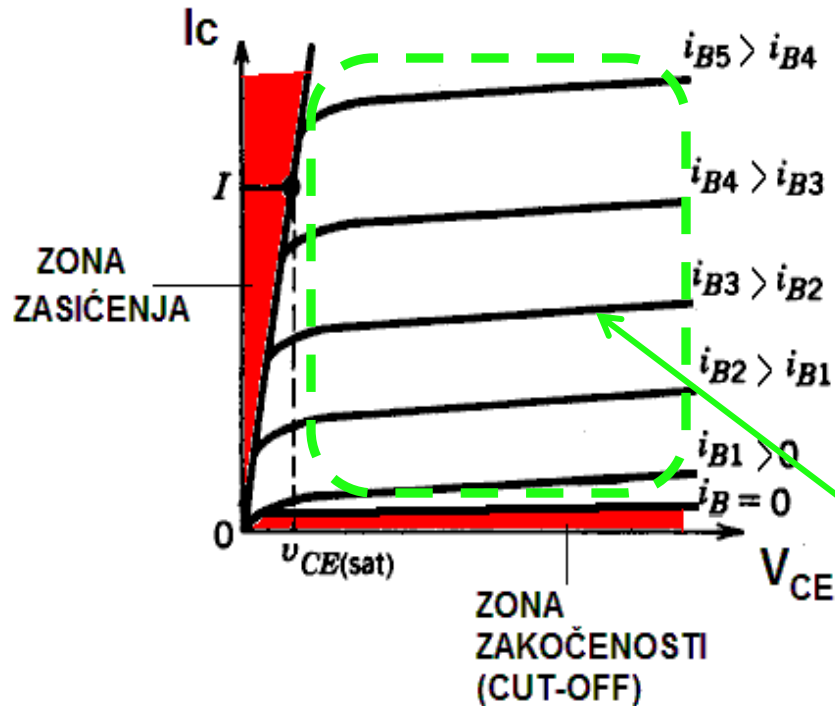
(b)

Prekidačka V-A karakteristika BJT, (a)-realna, (b)-idealna

Radna tačka tranzistora je određena presekom radne prave (karakteristika opterećenja) i V-A karakteristike tranzistora, za određenu struju baze  $i_B$ . **Kada je struja baze značajna, na primer  $i_B = i_{B5}$ , tada je radna tačka A u oblasti zasićenja. U ovoj oblasti tranzistor je uključen, (stanje ON) i približno je ekvivalentan zatvorenom prekidaču.** U stvarnosti on nije idealan prekidač već je na njegovim priključcima C-E, napon  $v_{CE} = v_{CE(SAT)} \approx 1V$ .

**Kada je struja baze  $i_B = 0$ , tada je radna tačka B u oblasti blokiranja.** U ovoj oblasti tranzistor je isključen (stanje *cut-off*) i ekvivalentan je otvorenom prekidaču. U stvarnosti kroz njega teče veoma mala struja  $I_C$ , koja predstavlja inverznu struju zasićenja kolektorskog spoja  $I_C(i_B = 0) = I_{CBO}$ .

## OBLAST AKTIVNOG REŽIMA

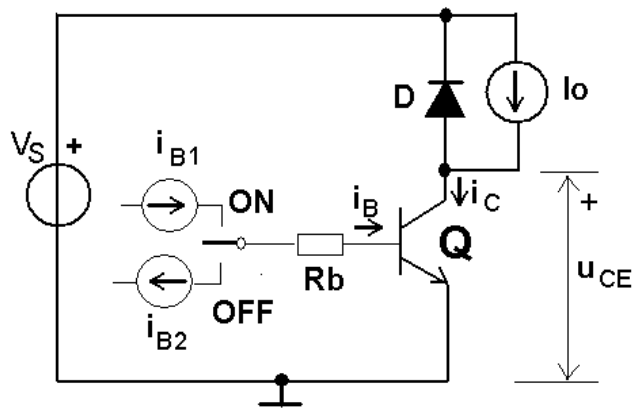


Oblast između zone zasićenja i zone blokiranja se naziva **oblast aktivnog režima rada** (linearni režim).

U ovoj zoni se imaju značajni disipacioni gubici.

U energetskim pretvaračima se BJT u ovoj zoni koristi samo u kratkotrajnim (prelaznim režimima) kao što su uključenje i isključenje.

# PREKIDAČKI REŽIM BJT



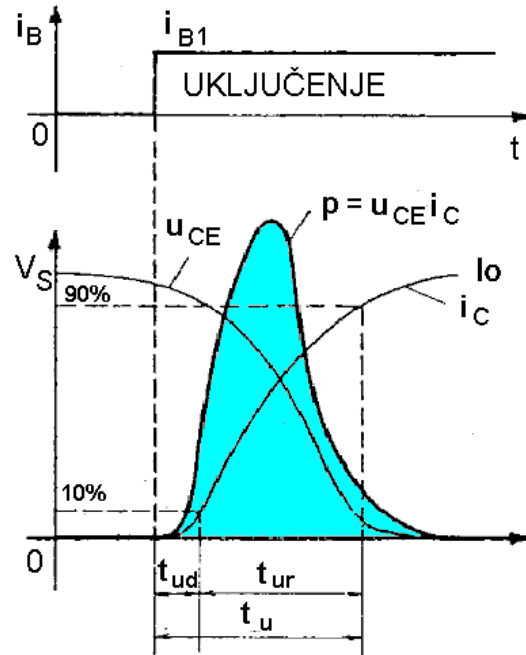
U STANJU VOĐENJA

$$u_{CE} = u_{CE(SAT)}$$

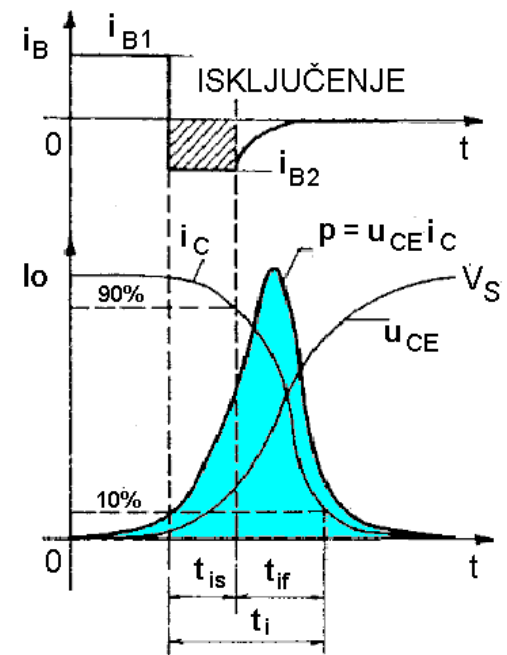
$$i_C = I_o$$

$$p = u_{CE} i_C = u_{CE(SAT)} \cdot I_o$$

(a)



(b)

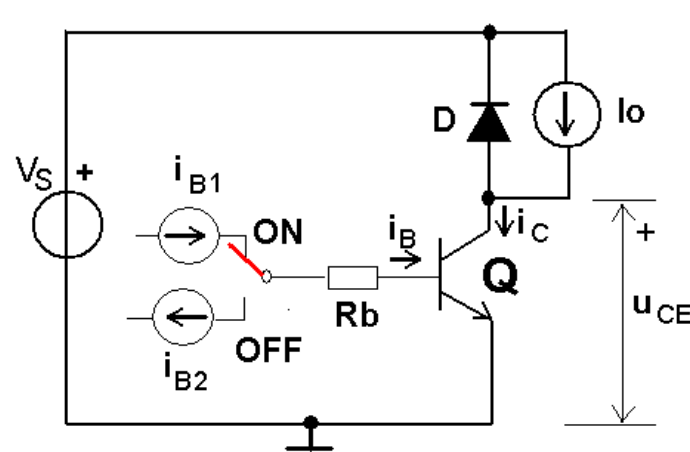


(c)

*Analiza prekidačkog režima BJT, (a)-prekidačko kolo, (b)-uključenje, (c)-isključenje*

Za razumevanje i analizu procesa uključenja i isključenja BJT se koristi osnovno prekidačko kolo čiji su karakteristični talasni oblici prikazani na slici. Na slici (a) je prikazano osnovno prekidačko kolo sa tranzistorom Q, diodom D i strujnim izvorom  $I_o$ . Pobuda tranzistora se ostvaruje iz dva nezavisna strujna izvora:  $I_{B1}$  za uključenje i  $I_{B2}$  za isključenje.

# UKLJUČENJE BJT

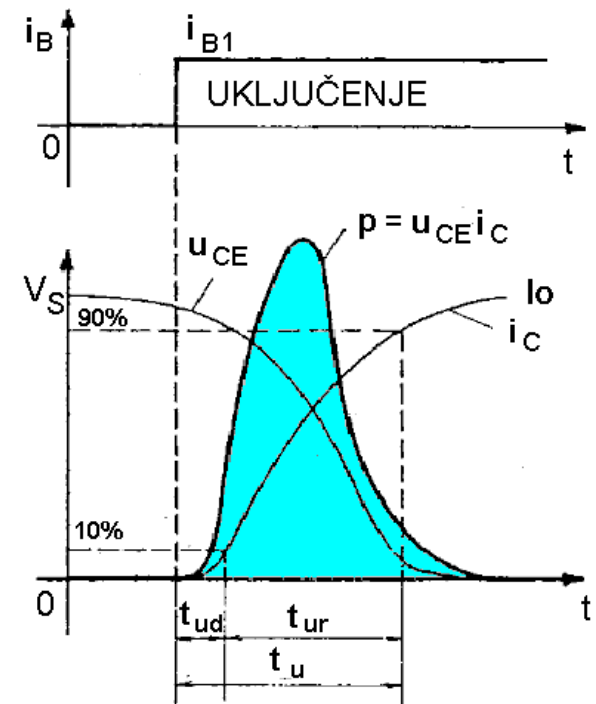


U STANJU VOĐENJA

$$u_{CE} = u_{CE(SAT)}$$

$$i_C = I_0$$

$$p = u_{CE} i_C = u_{CE(SAT)} \cdot I_0$$



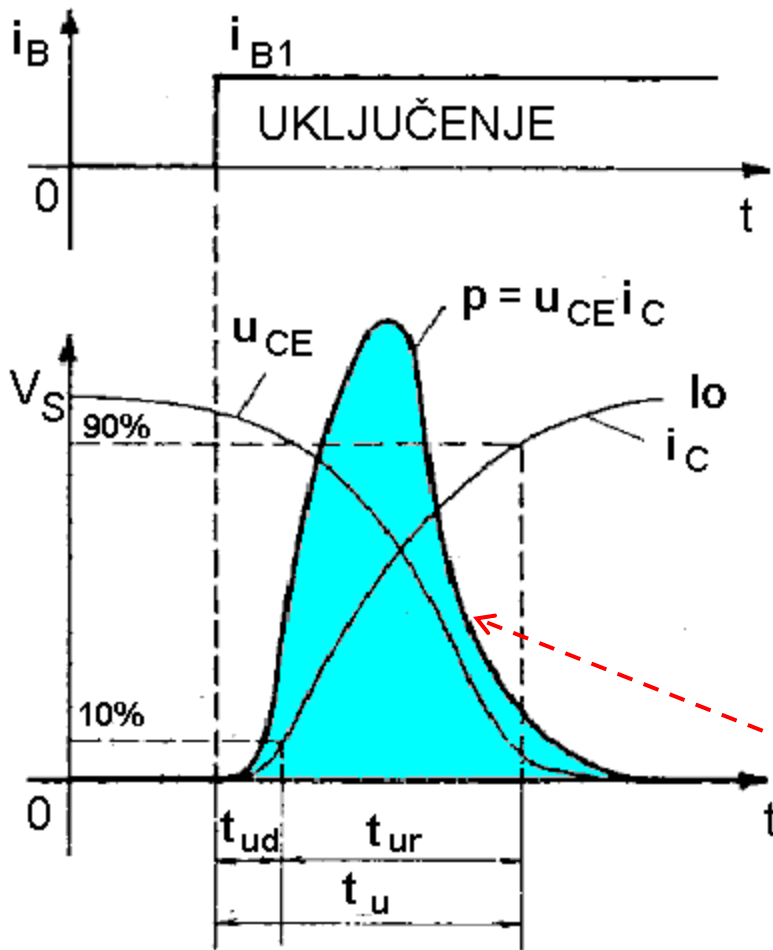
Nakon dovođenja pobudnog strujnog impulsa  $I_{B1}$ , struja tranzistora se počinje uspostavljati ali sa određenim kašnjenjem. Ovo **vreme kašnjenja (delay time)** pri uključenju je označeno sa  $t_{ud}$ . U toku ovog vremena se puni kapacitet spoja B-E, pa je ovo vreme određeno strujom punjenja i veličinom datog kapaciteta  $C_{BE}$ . Nakon toga dolazi do uspostavljanja struje kolektora tranzistora od vrednosti  $I_0$  za vreme  $t_{ur}$  koje ustvari predstavlja **vreme porasta struje pri uključenju (rising time)**. Ovo vreme je upravo potrebno da manjinski nosioci na putu kroz bazu stignu do kolektorskog spoja. U toku ovog vremena dakle dolazi do akumulacije manjinskih nosilaca u bazi i do porasta njihovog gradijenta koncentracije, pa tako raste i struja kolektora do svoje ustaljene vrednosti  $I_0$ . Ovaj efekat se još naziva i **efekat "širenja baze"**. Na kraju ovog procesa je praktično B-C spoj preplavljen manjinskim nosiocima i baza se proširila do svojih metalurških granica.

U katalogima proizvođača vreme porasta se definiše kao vreme za koje je potrebno da struja kolektora poraste sa 10% na 90% od svoje ustaljene vrednosti.

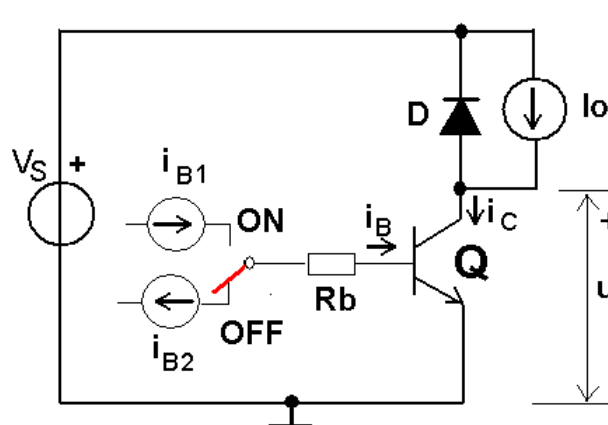
Vreme uključenja  $t_u$  predstavlja zbir vremena  $t_{ud}$  i  $t_{ur}$ .

U ovom intervalu uključenja napon na kolektoru tranzistora postepeno opada od vrednosti napona na kolektoru koja je jednaka naponu jednosmernog izvora napajanja  $V_S$ , na vrednost  $u_{CE(SAT)}$ .

U toku vremena uključenja tranzistor se ustvari nalazi u aktivnom režimu, te se stoga na njemu razvija značajna snaga disipacije (snaga gubitaka pri uključenju) koja je prikazana šrafiranom površinom



# ISKLJUČENJE BJT

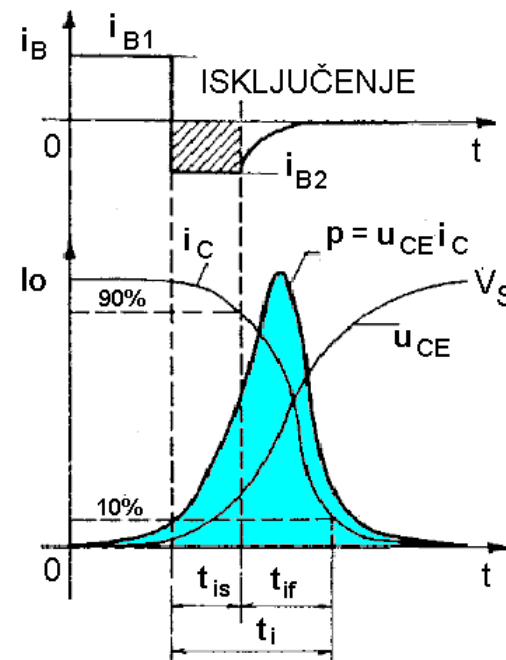


U STANJU VOĐENJA

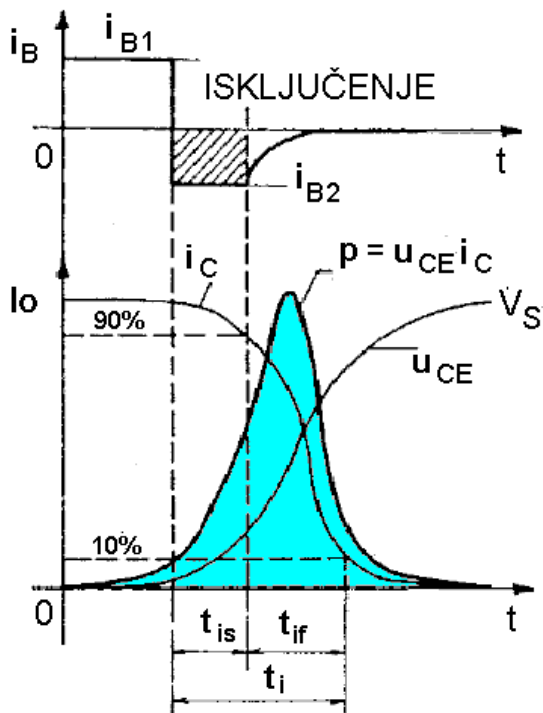
$$u_{CE} = u_{CE(SAT)}$$

$$i_C = I_o$$

$$p = u_{CE} i_C = u_{CE(SAT)} \cdot I_o$$



Pobuda BJT se sada ostvaruje prebacivanjem kontrolnog prekidača, tako da je sada aktivan strujni izvor  $I_{B2}$  u kolu baze, koji generiše struju suprotnog smjera dovodeći tranzistor u stanje blokiranja. Nakon dovodenja negativnog pobudnog strujnog impulsa  $I_{B2}$ , struja tranzistora počinje da opada ali sa određenim kašnjenjem. Ovo vreme kašnjenja pri isključenju se ponekad naziva i vreme nagomilavanja (*storage time*) i označeno je sa  $t_{is}$ . U ovom intervalu dolazi do evakuacije nagomilanih akumulisanih naelektrisanja. Obično se u ovom intervalu vrši prvo rasterećenje baze odvođenjem viška nosilaca naelektrisanja. U katalozima proizvođača se ovo vreme definiše kao vreme kašnjenja između trenutka pada bazne struje ispod 90% njene ustaljene vrednosti i trenutka pada kolektorske struje ispod 90% njene ustaljene vrednosti. Ovaj vremenski interval se naziva vreme opadanja (*fall time*) i označeno je sa  $t_{if}$ .



Nakon evakuacije viška nosilaca naelektrisanja menja se gradijent manjinskih nosilaca, odnosno sa njegovim padom opada i struja kolektora  $I_C$ .

Drugim rečima bazno područje se skuplja do svojih metalurških granica.

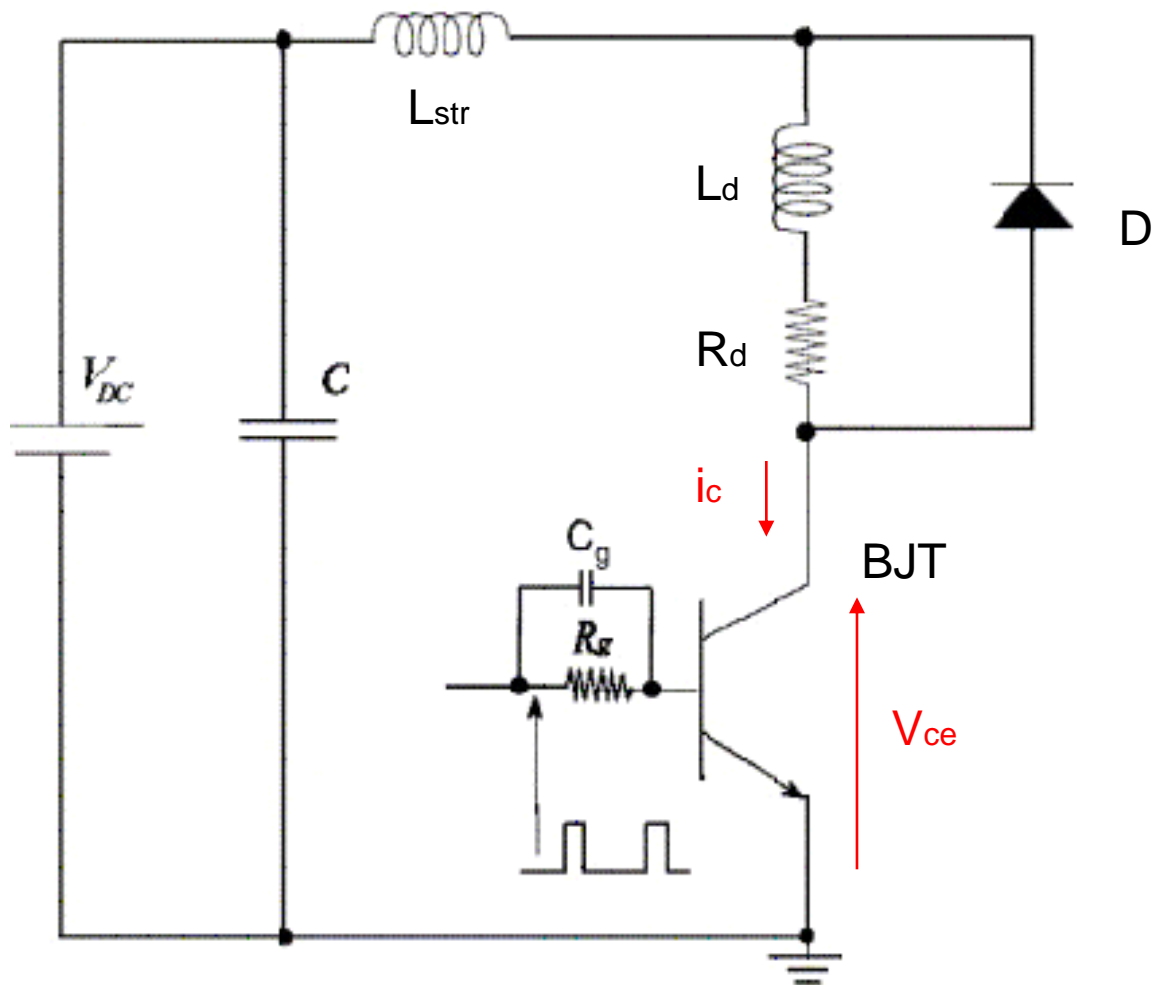
Vreme isključenja  $t_i$  predstavlja zbir vremena  $t_{is}$  i  $t_{if}$ .

U ovom intervalu isključenja napon na kolektoru tranzistora postepeno raste vrednosti napona na kolektoru  $u_{CE(SAT)}$ , koja je jednaka naponu zasićenja do vrednosti napona jednosmernog izvora napajanja  $-V_S$ .

U ovom intervalu tranzistor se takođe nalazi u aktivnom režimu, te stoga na njemu razvija značajna snaga disipacije (snaga gubitaka pri isključenju) koja je prikazana šrafiranom površinom.

**KAKO IZGLEDAJU TALASNI OBLICI NA REALNOM SISTEMU?**





Hard switching induktivnog opterećenja  
TALASNI OBLICI STRUJE I NAPONA BJT

UKLJUČENJE

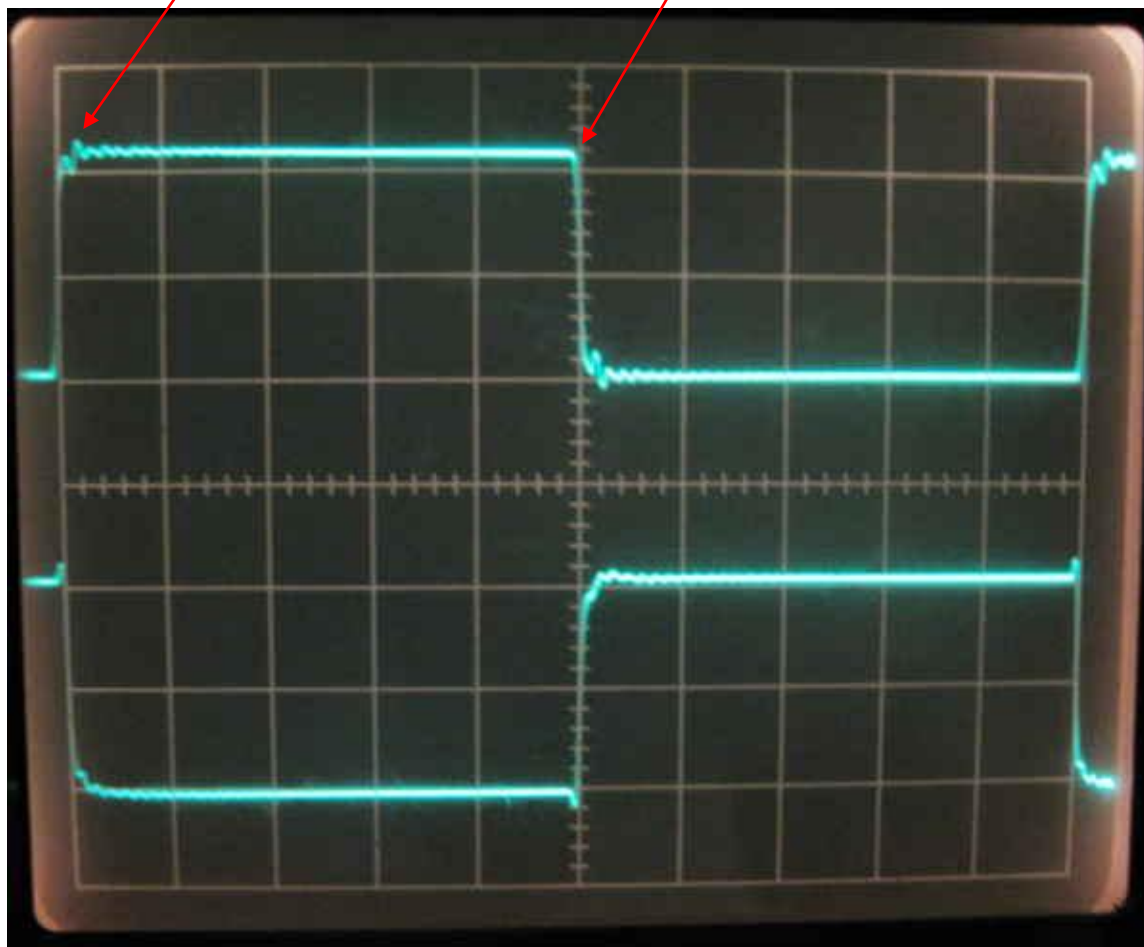
ISKLJUČENJE

$I_c$   
struja  
kolektora  
20A/c

0 —

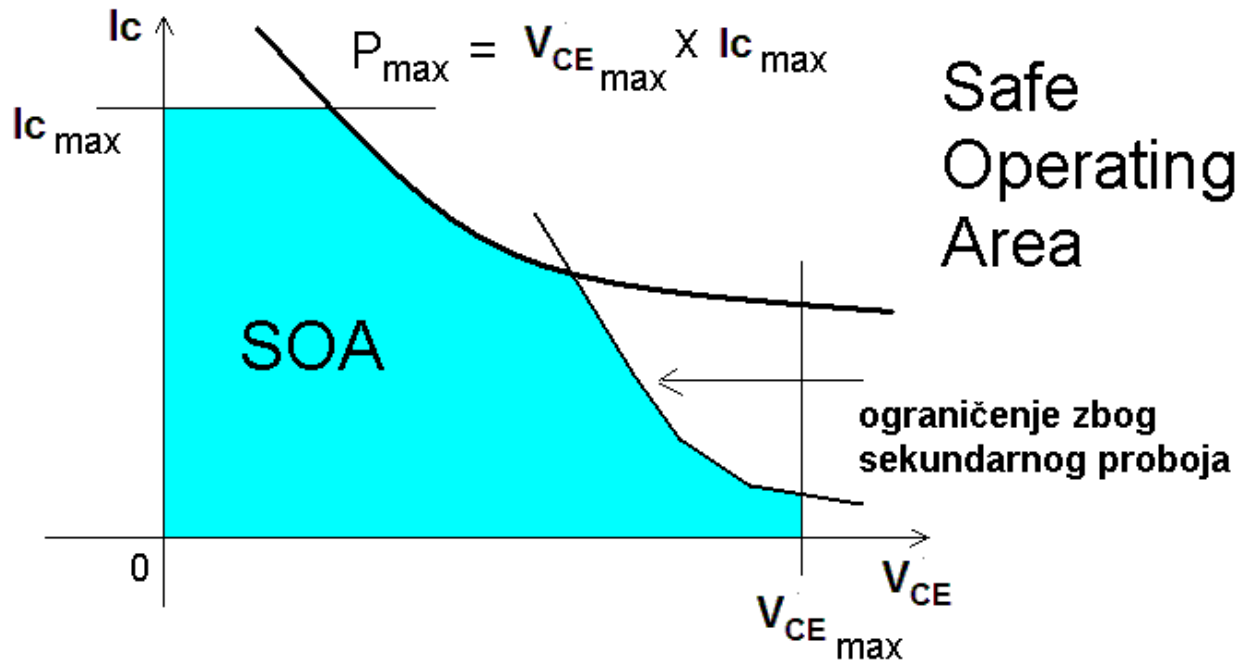
$V_{ce}$   
Napon  
C-E  
300V/c

0 —



Time: 10us/C

## REŽIM VOĐENJA BJT

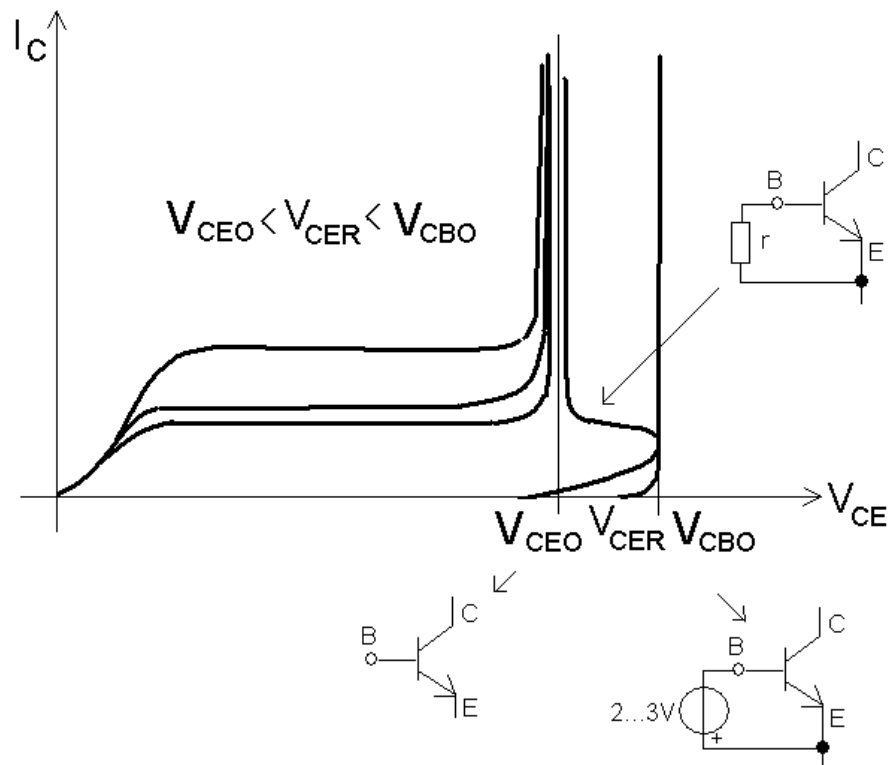


U režimu vođenja (*on-state*) napon na spoju C-E je jednak  $u_{CE(SAT)}$ , dok je struja kolektora  $I_C = I_0$ . Snaga gubitaka u ovom slučaju je jednaka  $P_{ON} = u_{CE(SAT)} \cdot I_0$ .

Oblast dozvoljenog rada BJT odnosno **SOA (Safe Operating Area)** je prikazana na slici.

Pored ograničenja maksimalne snage disipacije na dijagramu se uočava i ograničenje zbog sekundarnog proboja, kada dolazi do lokalnog fokusiranja struje i uništenja kolektorskog spoja.

## Probojni naponi BJT



Probojni napon je karakterističan za stanje kad je tranzistor blokiran.

Napon doveden između kolektora i emitora trpi PN spoj C-B.

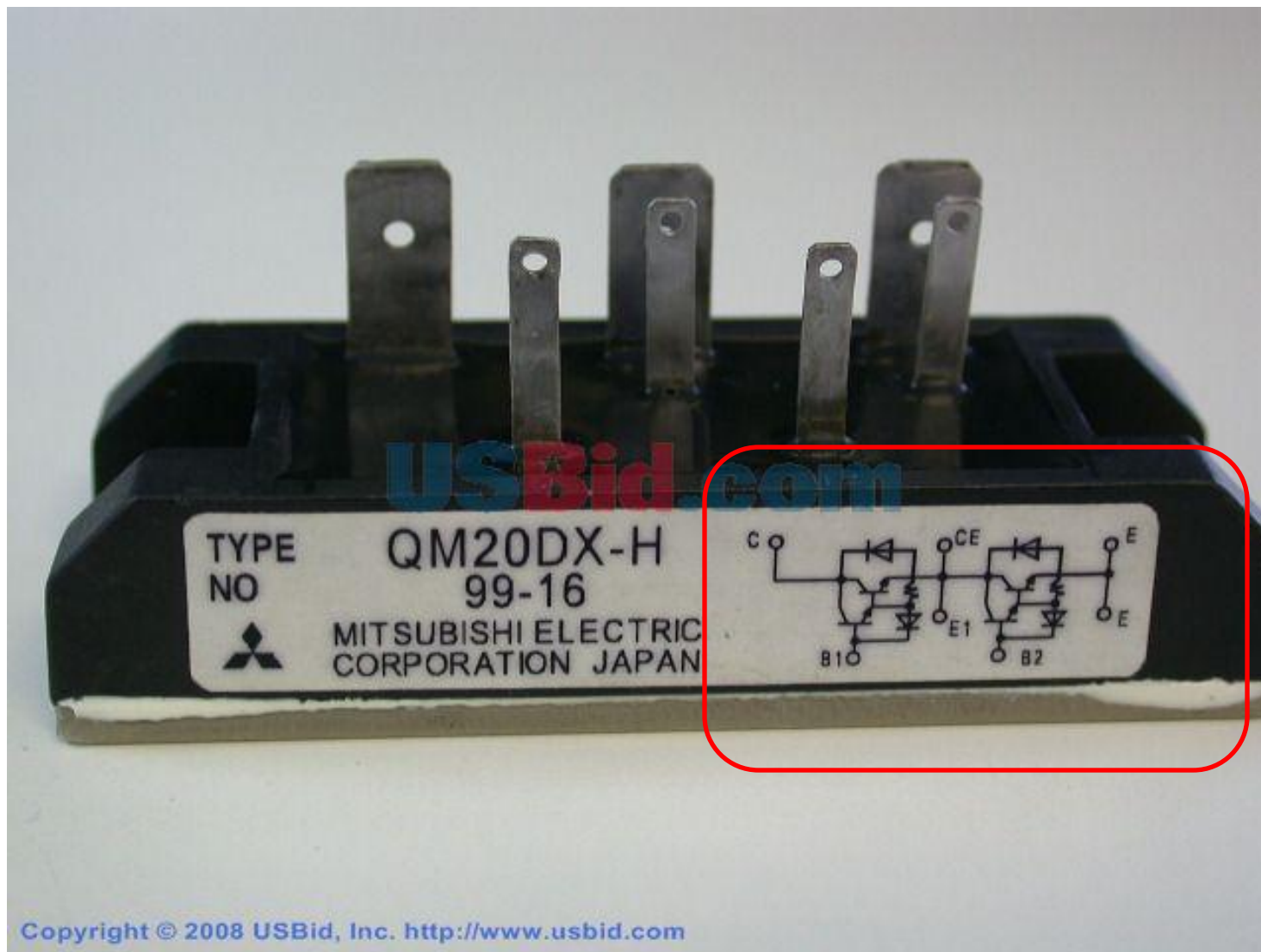
Taj napon se u katalogizima proizvođača obeležava sa  $V_{CBO}$ .

Najniži probojni napon između kolektora i emitora se obeležava sa  $V_{CEO}$  i daje se za slučaj kada je baza otvorena. Tada se upravo pojačava sva inverzna struja zasićenja kolektorskog spoja. Ovaj parametar je važan za korisnika jer predstavlja granicu napona ispod koje sigurno neće nastupiti proboj.

U katalogizima se može naći i probojni napon između kolektora i emitora- $V_{CEX}$  u slučaju da je emitorski spoj inverzno polarisan pri naponu inverzne polarizacije 2...3V. Ovaj napon je blizak  $V_{CBO}$ . Poslednji važan parametar u vezi probojnih napona, je probojni napon između kolektora i emitora u slučaju kada se između baze i emitora nalazi električni otpor  $R$  i obeležava se sa  $V_{CER}$ . Između navedenih probojnih napona postoji odnos:  $V_{CEO} < V_{CER} < V_{CEX} < V_{CBO}$ .

Ograničenja u pogledu maksimalnih napona i struja:

<b><u>Polupr. komponenta</u></b>	<b><u>Napon (V)</u></b>	<b><u>Struja (A)</u></b>
Tiristor (SCR)	6000	3500 (5000)
GTO / IGCT	4500	3000 (4500)
Triak	800	40
Bipolarni tranzistor	1200	800
MOSFET	500 (1200)	140
IGBT	600 (3500)	50 (1200)
SIT	800	60
SITH	1200 (4000)	800 (2200)
MCT	600 (3000)	60



Snažni poluprovodnički modul QM20DX ( vertikalna mosta sa dva BJT u Darlington spoju. Karakteristike: 600V/20A

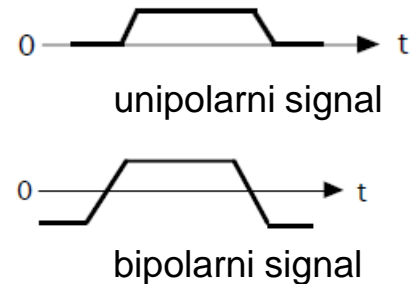
# POBUDNA KOLA BIPOLARNIH TRANZISTORA

- Cilj je uključenje tranzistora i prelaz iz stanja OFF-state u stanje ON-state sa što manjom disipacijom (što manje zadržavanje u aktivnom režimu)
- Cilj je isključenje tranzistora i prelaz iz stanja ON-state u OFF-state, takođe sa što manjom disipacijom
- Pouzdano održavanje u oba stanja (ON-state i OFF-state)
- Cilj je takođe obezbediti prenaponsku i prekostrujnu zaštitu tranzistora
- Logički kontrolni signali nisu deo pobudnog kola i mora se obezbediti pouzdano odvajanje, obzirom da je pobudno kolo na potencijalu energetskog prekidača (tranzistora). Ovaj prekidač je na visokom naponu max 1kV. Najpouzdanije odvajanje je galvanska izolacija logičkih kola od pobudnog kola.
- Logički kontrolni signali su 0-5Vdc, a napon pobudnog kola je veći tipično 12Vdc, 15Vdc, 24Vdc. Tako da pobudno kolo mora da obezbedi ovo prilagođenje.
- Pobudno kolo je ustvari pojačavač snage, obzirom da je snaga potrebna za uključenje i isključenje tranzistora značajnija od one koja se ima u logičkim kolima.

# OPŠTA RAZMATRANJA O POBUDNIM KOLIMA TRANZISTORA

## Topologije pobudnih kola

- Izlazni signal može biti unipolaran ili bipolaran
- AC ili DC sprega
- Priključenje paralelno ili redno sa snažnim prekidačem



## Izlazna struja pobudnog kola

- Ako je struja uključanja tranzistora velika vreme uključanja je kratko ali je vreme isključenja duže (kašnjenje isključenja)
- Ako je struja isključenja tranzistora velika vreme isključenja je kraće ali je kašnjenje uključanja veće.

## Zaštita prekidača

- Prekostrujna i prenaponska
- Mora biti ugrađeno tzv. “mrtvo vreme” u pobudno kolo, naročito u mosnim i polumosnim primenama (H-most); primene u invertorima

## **Oblik pobudnih impulsa**

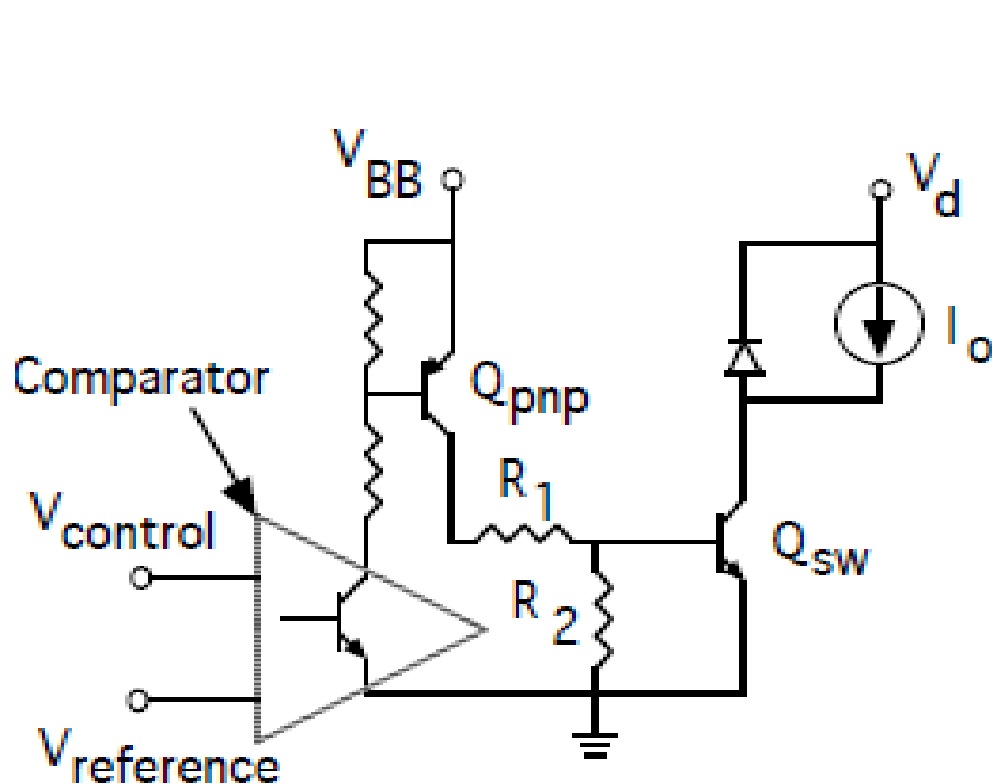
- Kontrolisan  $di/dt$  pobudne struje baze kod isključenja tranzistora
- Antisaturacione diode za povećanje brzine rada
- SPEED-UP kondenzatori

## **Razvoj štampane ploče pobudnog kola**

- Minimiziranje rasipnih induktivnosti
- Oklapanje i zaštita od prekidačkog šuma (VF smetnji)



# PRIMER: UNIPOLARNO DC SPREGNUTO POBUDNO KOLO



$$V_{\text{control}} > V_{\text{reference}}$$

$Q_{\text{pnp}}$   
 $Q_{\text{sw}}$  **ON**

$$V_{\text{control}} < V_{\text{reference}}$$

$Q_{\text{pnp}}$   
 $Q_{\text{sw}}$  **OFF**

**DIZAJN:**

$$R_2 = \frac{V_{\text{BE,off}}}{I_{\text{B,off}}} \leftarrow \text{zahtevano vremenom Isključenja toff}$$

$$I_{\text{pnp}} = I_{\text{B,on}} + \frac{V_{\text{BE,on}}}{R_2}$$

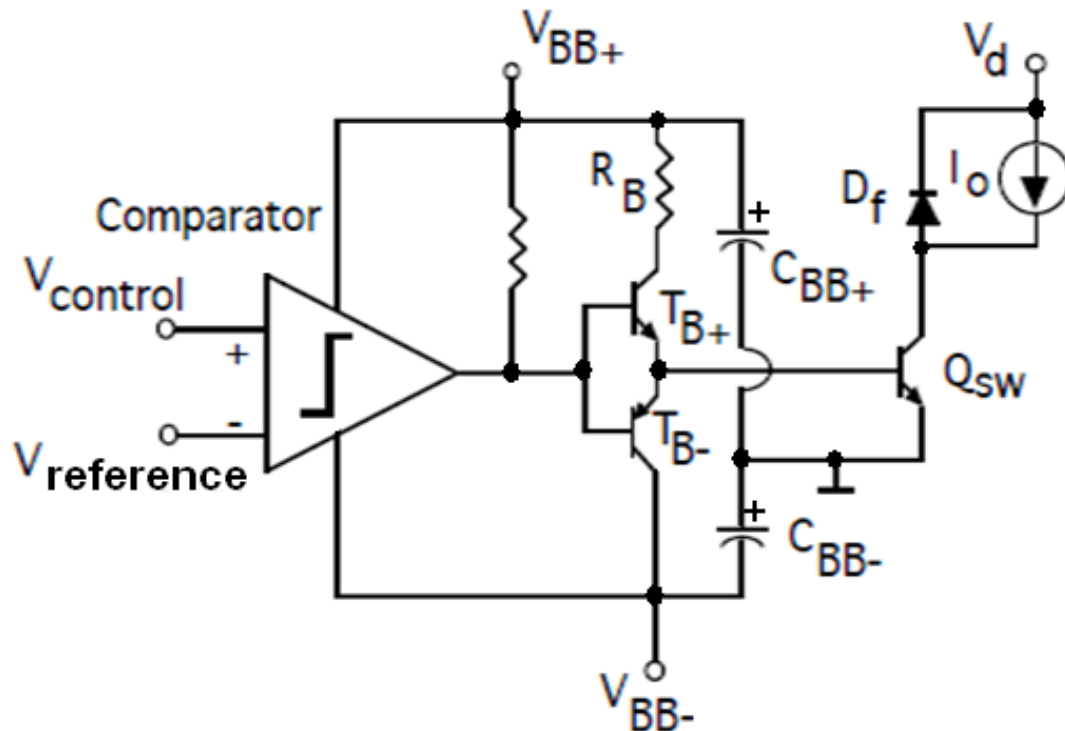
$I_{\text{B,on}} \leftarrow$  Bazirano na pojačanju  $\beta$  tranzistora  $Q_{\text{sw}}$  i struji  $I_o$

$$V_{\text{BB}} = V_{\text{CE,on}}(Q_{\text{pnp}}) + R_1 I_{\text{C,pnp}} + V_{\text{BE,on}}(Q_{\text{sw}})$$

$$V_{\text{BB}} = 8 - 10\text{V}$$

**Kompromis između velikih vrednosti koje minimiziraju efekat VBE varijacija i malih vrednosti koje minimiziraju disipaciju snage u pobudnom kolu.**

## PRIMER: BIPOLARNO DC SPREGNUTO POBUDNO KOLO



$$V_{\text{control}} < V_{\text{reference}}$$

Izlaz komparatora "LOW"

$$T_{B-} \text{ on } Q_{sw} \text{ off.}$$

Značajna inverzna struja baze obezbeđuje minimiziranje vremena  $t_{\text{off}}$ , a negativni napon na spoju B-E od  $Q_{sw}$  obezbeđuje stabilno stanje OFF-state prekidača  $Q_{sw}$ .

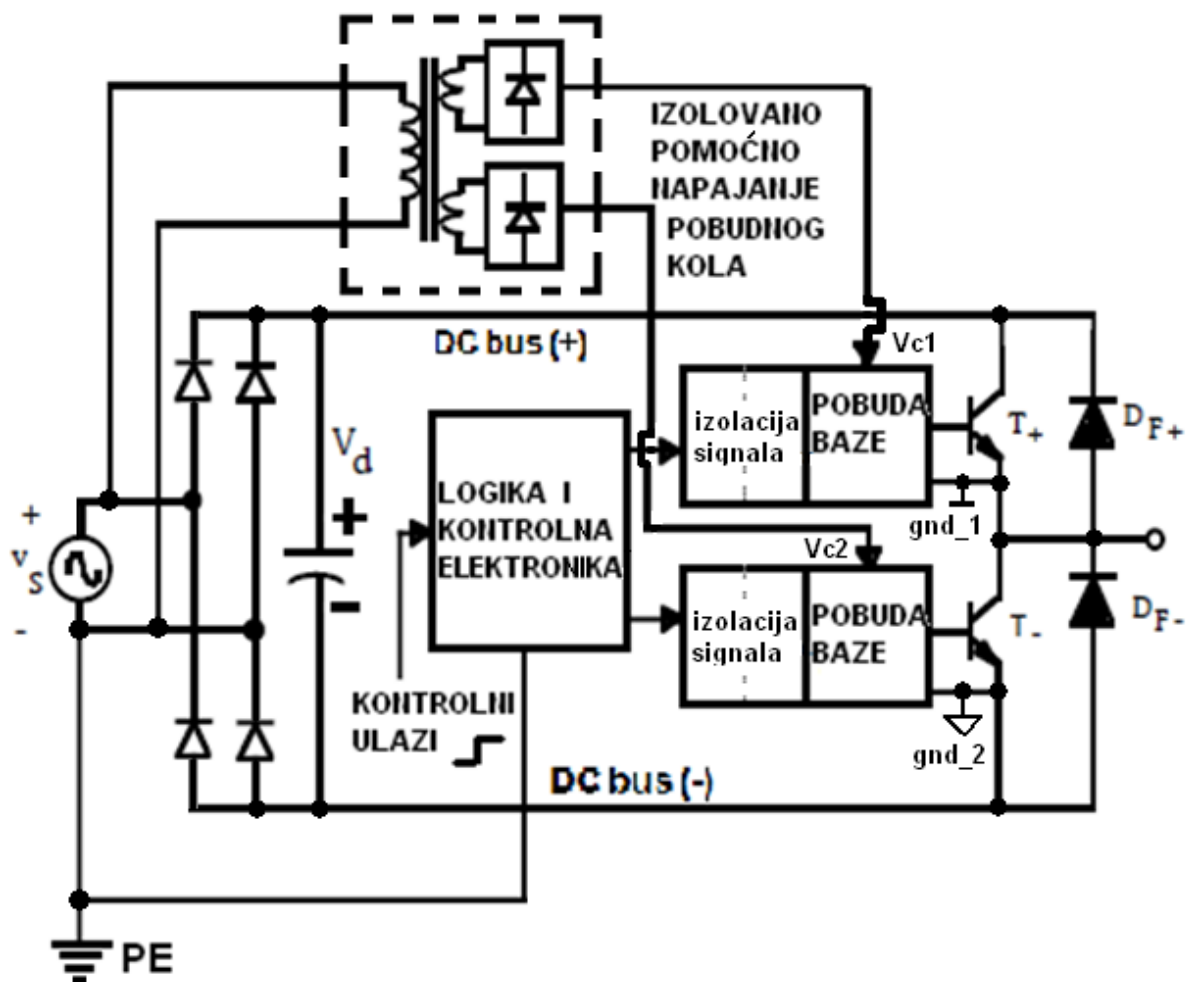
$$V_{\text{control}} > V_{\text{reference}}$$

Izlaz komparatora "HIGH"

$$T_{B+} \text{ on } Q_{sw} \text{ on}$$

Značajna direktna polarizacija baze  $Q_{sw}$  obezbeđuje minimiziranje vremena  $t_{\text{on}}$ , a pozitivan napon na spoju B-E od  $Q_{sw}$  obezbeđuje stabilno stanje ON-state odnosno saturaciju (zasićenje) prekidača  $Q_{sw}$ .

## ZAHTEVI ZA GALVANSKOM IZOLACIJOM POBUDNOG KOLA



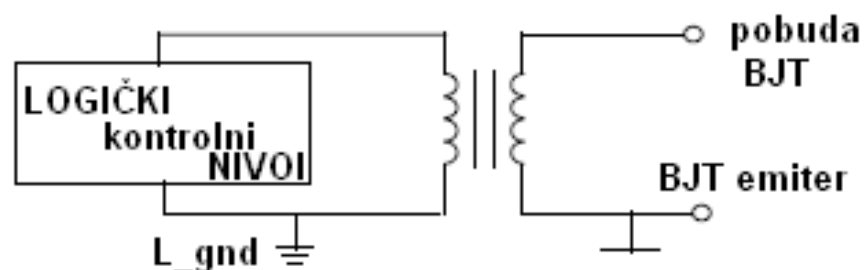
zaštitno  
(sigurnosno)  
uzemljenje

Promene potencijala emitora ( $T_+$  i  $T_-$ ) u odnosu na PE, odnosno masu kontrolne logike zahtevaju galvansku izolaciju pobudnog kola baze tranzistora !!!!

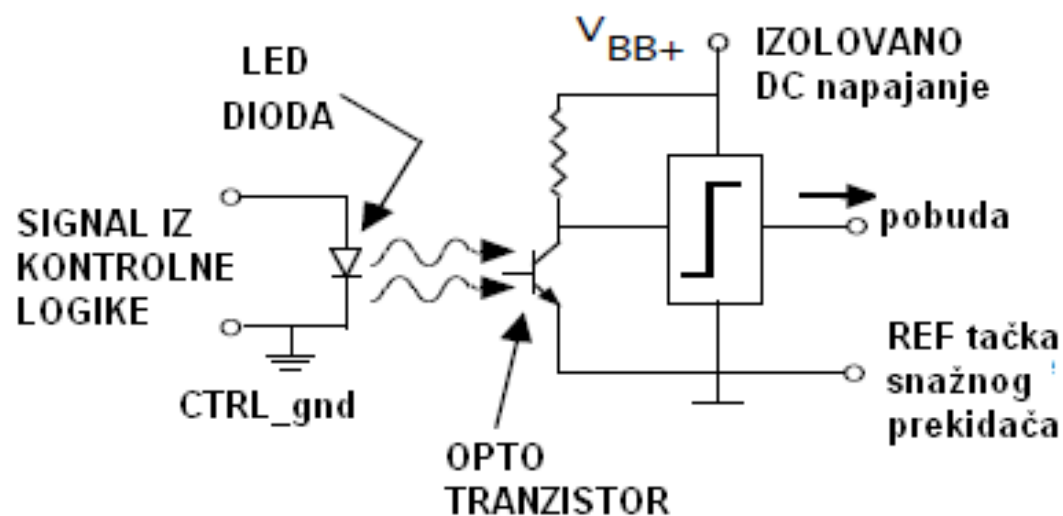
**Negativna poluperioda  $V_s(t)$**  – pozitivni DC BUS je na potencijalu PE. Potencijal emitora od  $T_-$  relativno visok i negativan u odnosu na PE (u isto vreme i logičku masu kontrolne elektronike)

**Pozitivna poluperioda  $V_s(t)$**  – negativni DC BUS je na potencijalu PE. Potencijal emitora od  $T_+$  relativno visok i pozitivan u odnosu na PE (logičku masu) ako je  $T_-$  OFF.

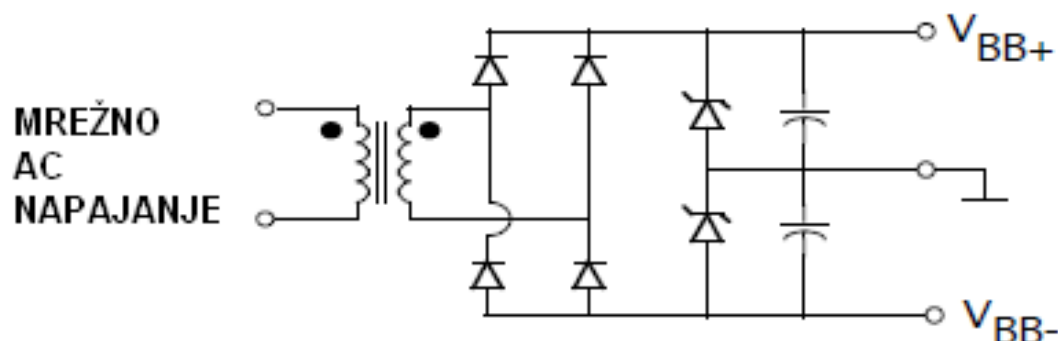
# METODE GALVANSKE IZOLACIJE



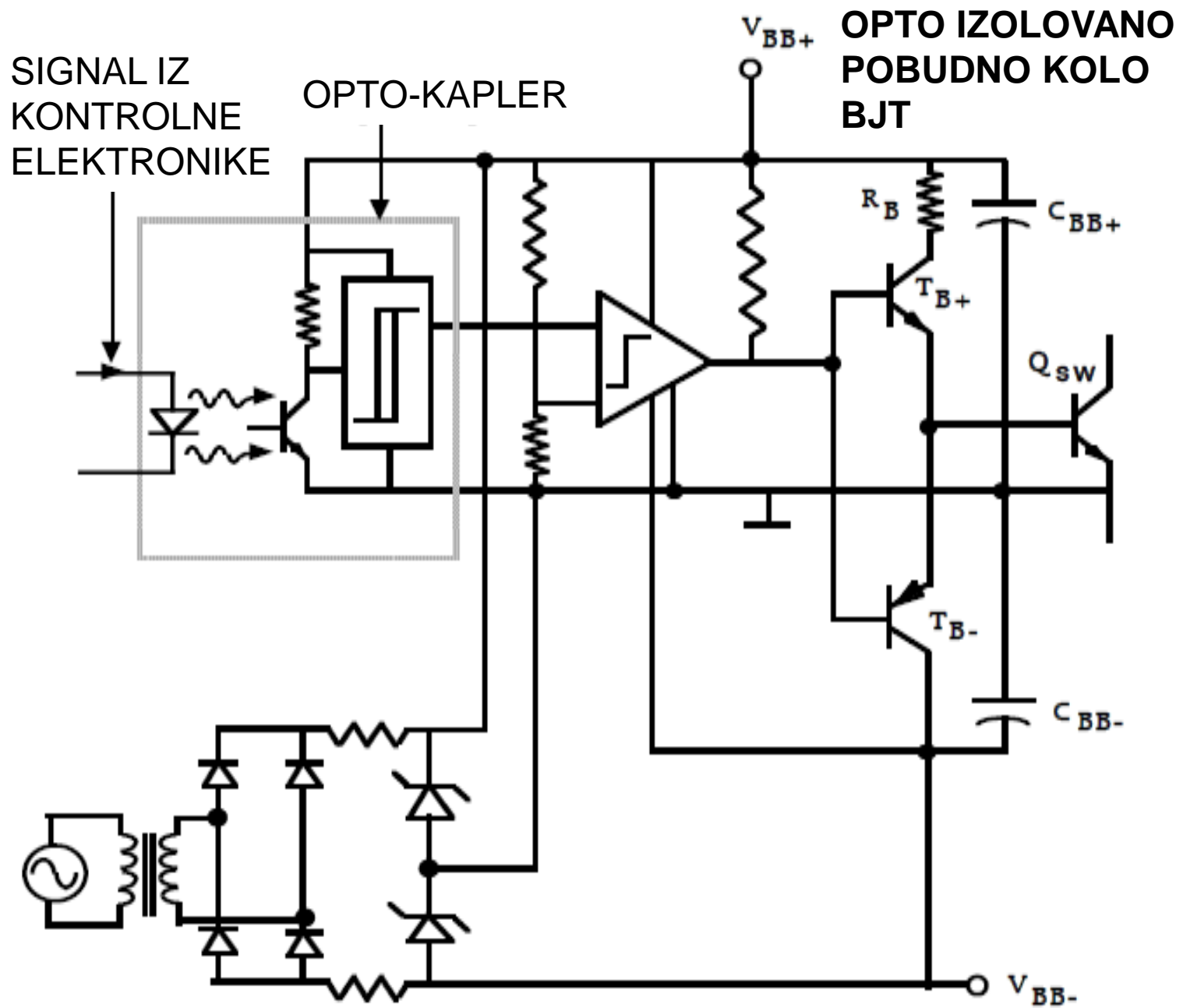
GALVANSKA IZOLACIJA  
IMPULSNIM  
TRANSFORMATOROM

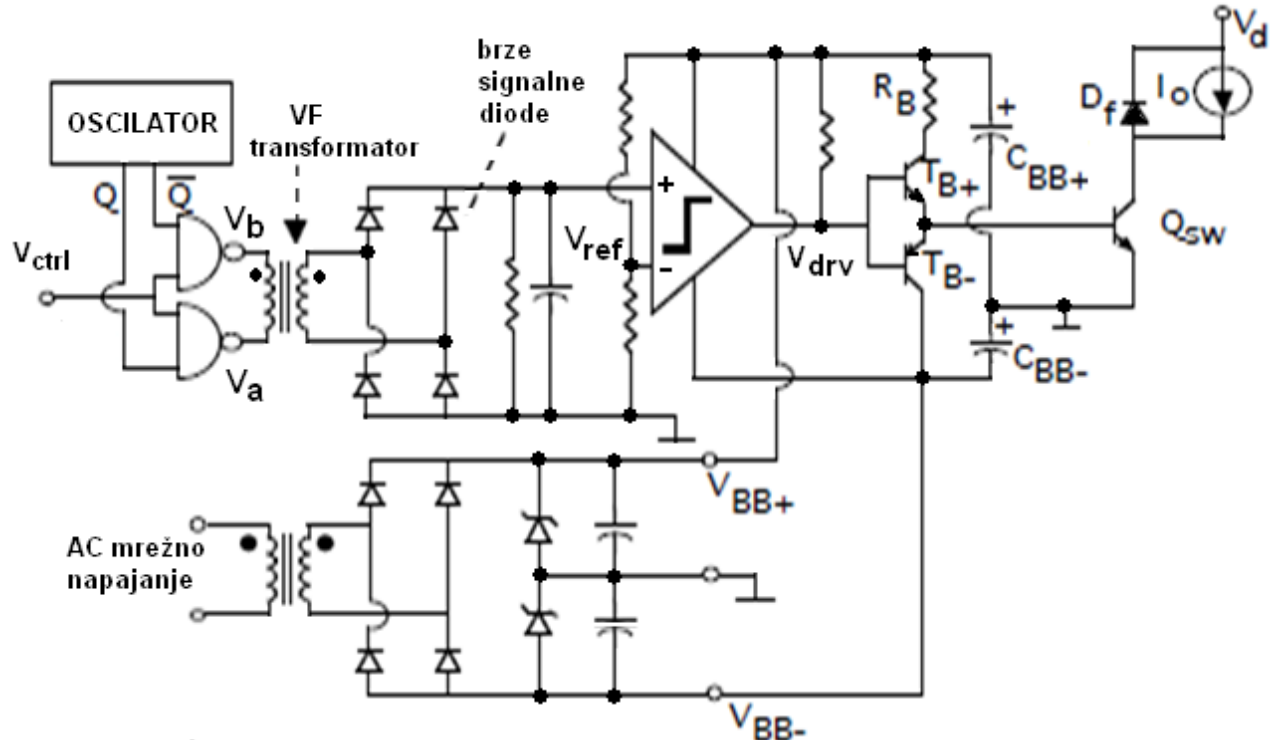


OPTOKAPLERSKA  
IZOLACIJA

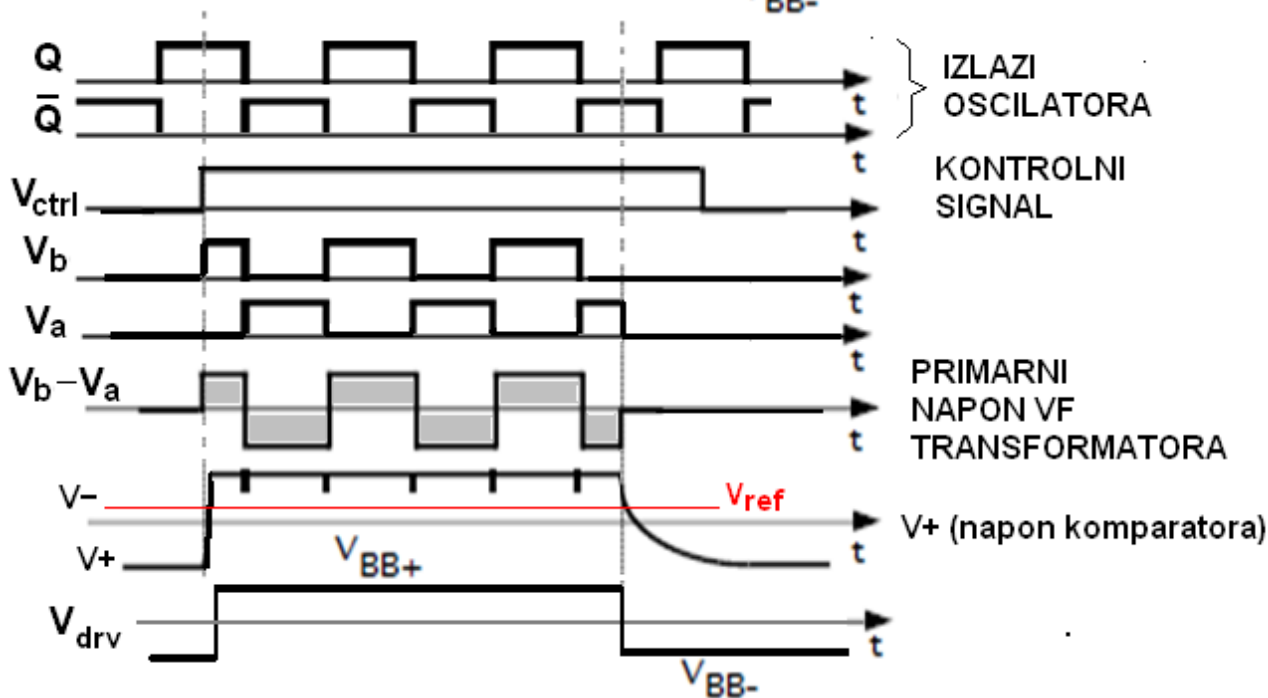


IZOLOVANI DC  
IZVOR NAPAJSANJA  
ZA POBUDNO KOLO  $\pm V_{BB}$

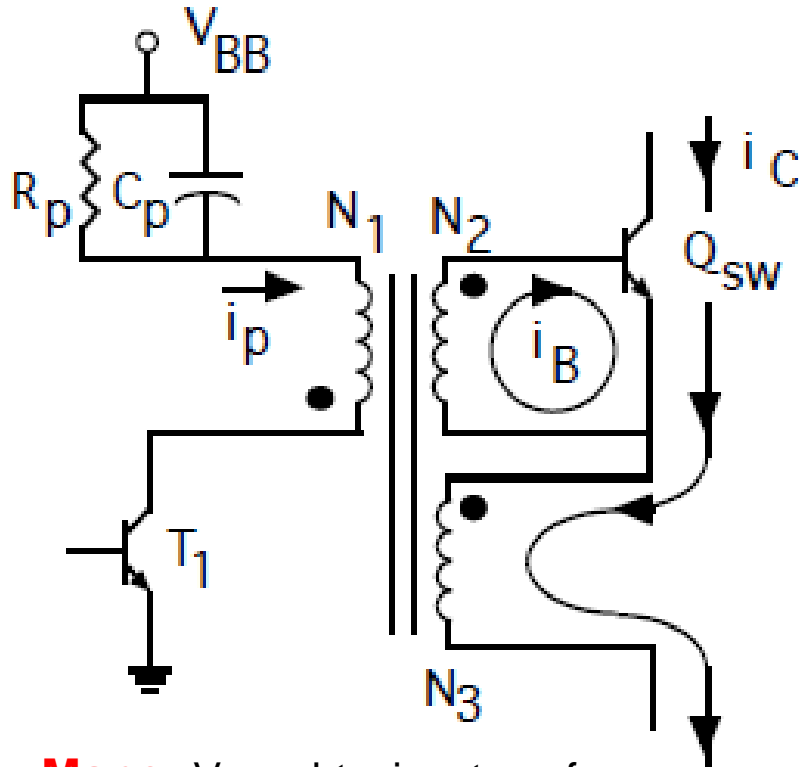




**POBUDNO KOLO BJT  
SA GALVANSKOM  
IZOLACIJOM  
IZVEDENOM PREKO  
VF IMPULSNOG  
TRANSFORMATORA  
I MREŽNOG  
TRANSFORMATORA**



# GALVANSKI IZOLOVANO POBUDNO KOLO *BJT* BEZ POMOĆNOG *DC* IZVORA



**Mane:** V-s zahtevi za transf.,  
ograničen duty-cycle

$$T_1 \text{ on} \longrightarrow Q_{sw} \text{ off}$$

$$i_p = V_{BB}/R_p$$

**ISKLUČENJEM  $T_1$**  nagomilana energija u vazdušnom zazoru impulsnog transformatora indukuje pozitivnu baznu struju  $Q_{sw}$ ; ovim **dolazi do aktiviranja  $Q_{sw}$**  i počinje da teče bazna struja:

$$i_B = N_3 i_C / N_2$$

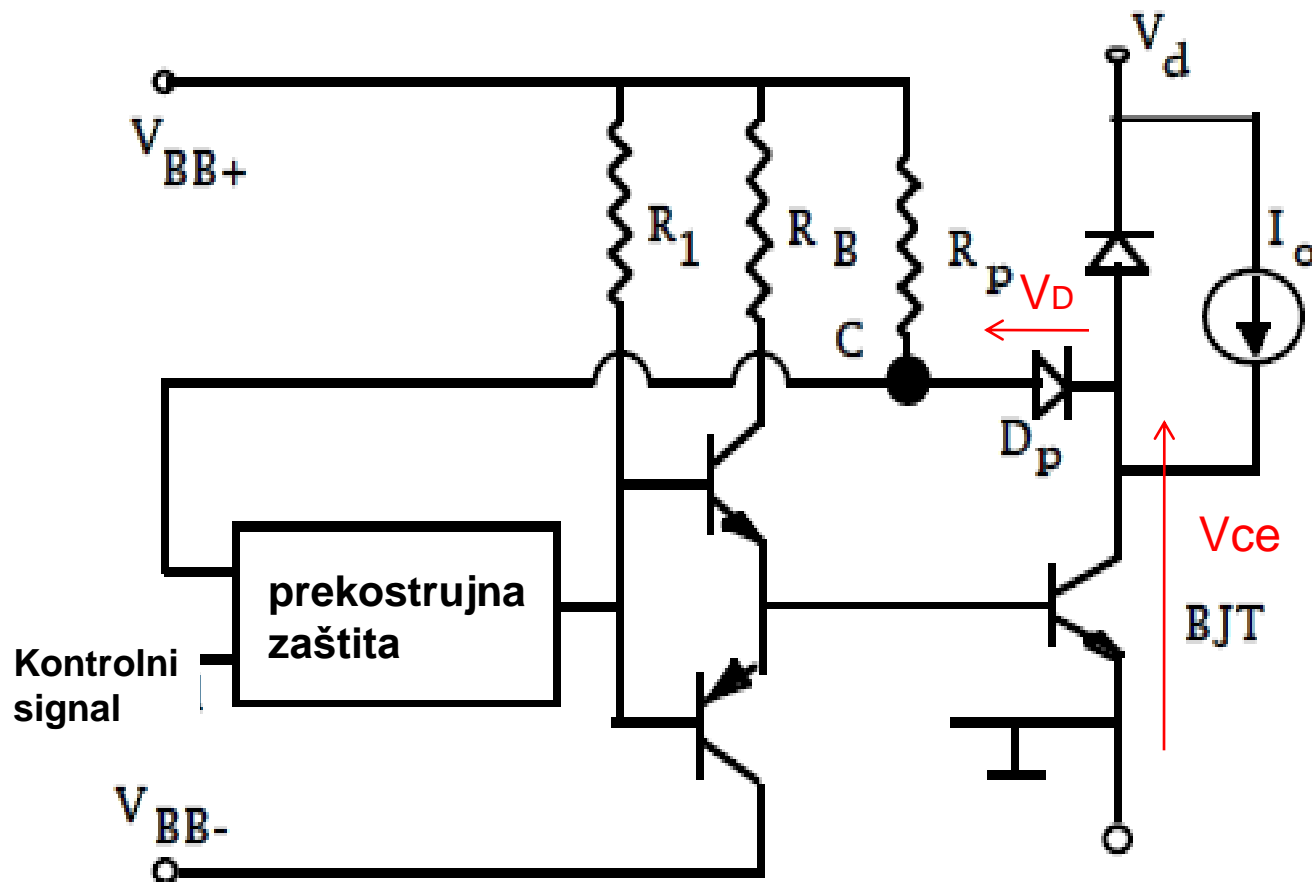
Regenerativnim dejstvom u kolu transformatora obezbeđuje se pobuda  $Q_{sw}$  baznom strujom  $Q_{sw}$ ; ova struja ga drži u stanju "ON" čak i kada je ukinuta primarna pobuda odnosno kada je  $i_p=0$  !!!!

## UKLJUČENJEM $T_1$ dolazi do isključenja $Q_{sw}$

Pozitivna struja  $i_p$  prouzrokuje baznu struju:  $i_B = N_3 i_C / N_2 - N_1 i_p / N_2$

$$(i_p(0^+) = \beta i_{B1}(0^+)) \longrightarrow Q_{sw} \text{ turned off}$$

## PREKOSTRUJNA ZAŠTITA BJT



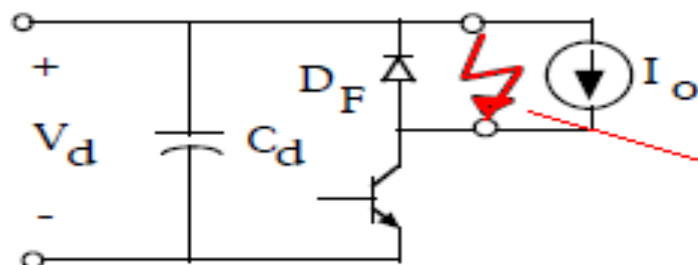
Porast  $V_{ce}$  usled velike struje BJT dovodi preko diode  $D_p$  do porasta potencijala tačke C, a napon sa ove tačke je ulaz u kolo prekostrujne zaštite:

$$V_c = V_{ce} + V_D$$

Ako potencijal tačke C raste iznad određenog praga (prag zaštite) i kontrolni signal je polarizovao BJT u stanju ON, blok prekostrujne zaštite dovodi do isključenja BJT. BJT je isključen sve dok se ne obezbedi reset zaštite (ručno ili automatski)

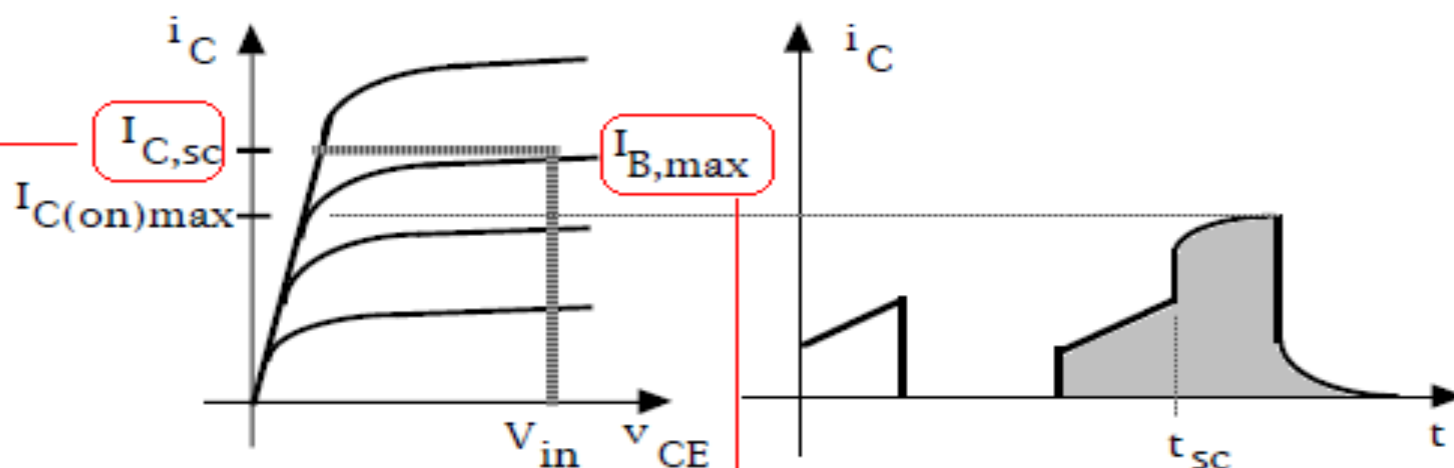


# OGRANIČENJE PREVELIKIH STRUJA OGRANIČENJEM ON-STATE BAZNE STRUJE



PRETPOSTAVLJA SE  
KRATAK SPOJ U  
TRENUTKU

$$t = t_{sc}$$



$I_{C,sc}$  → **MAKSIMALNO DOZVOLJENA TRENUTNA  
STRUJA KOLEKTORA**

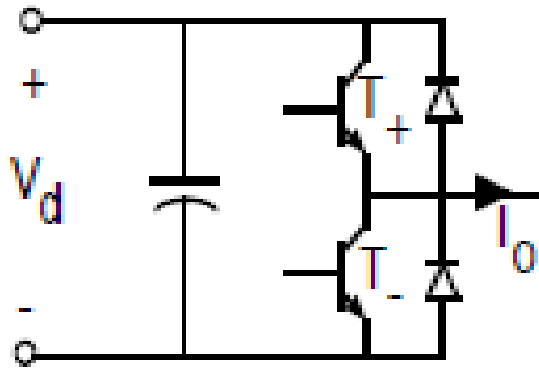
Prekostruja je ograničena na

$$I_{C(on)max} < I_{C,sc}$$

uz uslov

$$I_{B,max} < I_{C,sc} / \beta$$

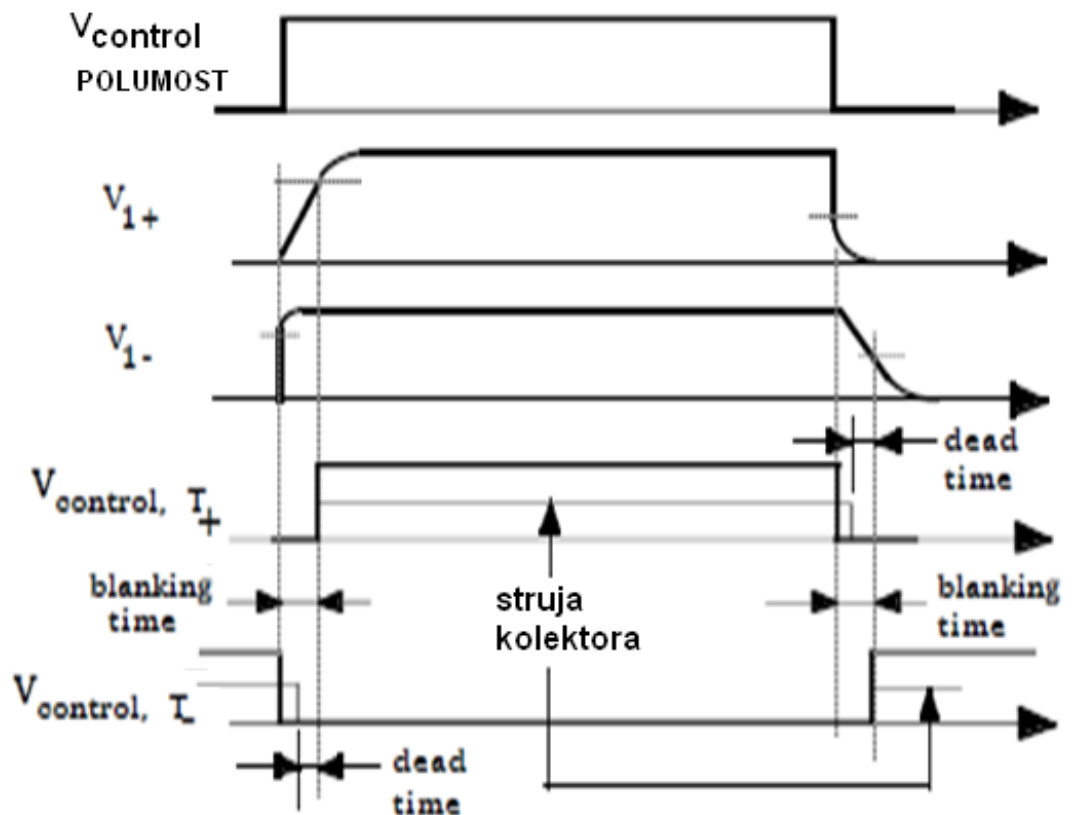
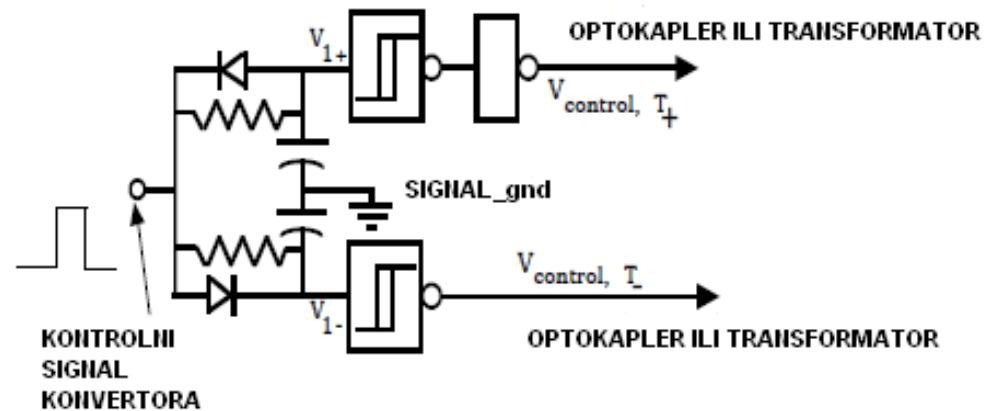
## “MRTVO VREME”- *Engl. DEAD TIME* u POBUDNIM KOLIMA BJT



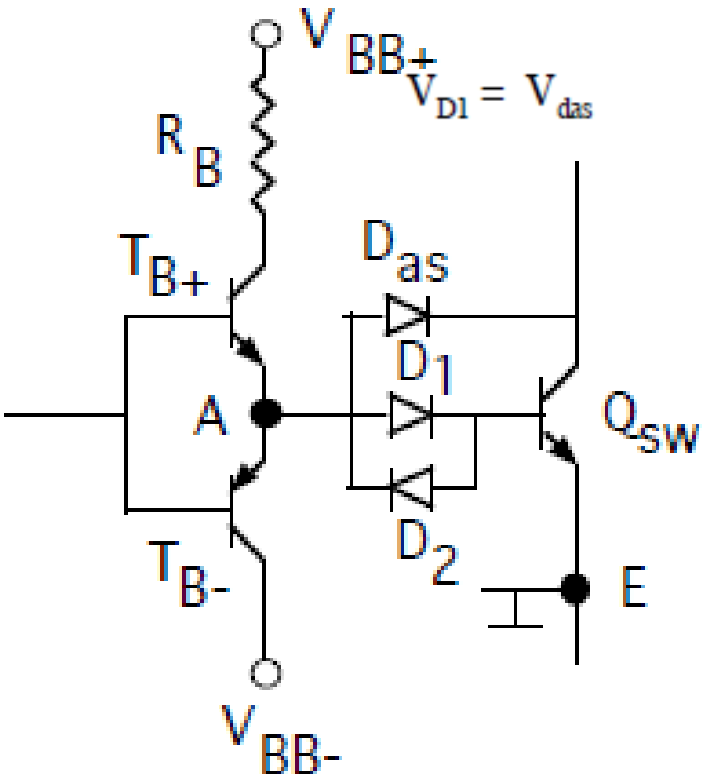
Isključenje  $T_+$  pre uključanja  $T_-$  dovodi do preklapanja njihovih vođenja što predstavlja kratak spoj za DC jednosmerni izvor  $V_d$

**OVO PREDSTAVLJA  
VELIKI PROBLEM  
U MOSNIM I POLUMOSNIM  
APLOKACIJAMA!!!!**

**Treba razlikovati  
“DEAD TIME” od  
“BLANKING TIME”!!!!**



# TEHNIKE ZA POBOLJŠANJE RADA BJT



-Antisaturaciona dioda  $D_{as}$  drži  $Q_{sw}$  na granici između aktivnog režima i zasićenja.

-Ovim je brzina rada  $Q_{sw}$  značajno povećana

$$V_{AE} = V_{BE(on)} + V_{D1} = V_{CE(on)} + V_{das}$$

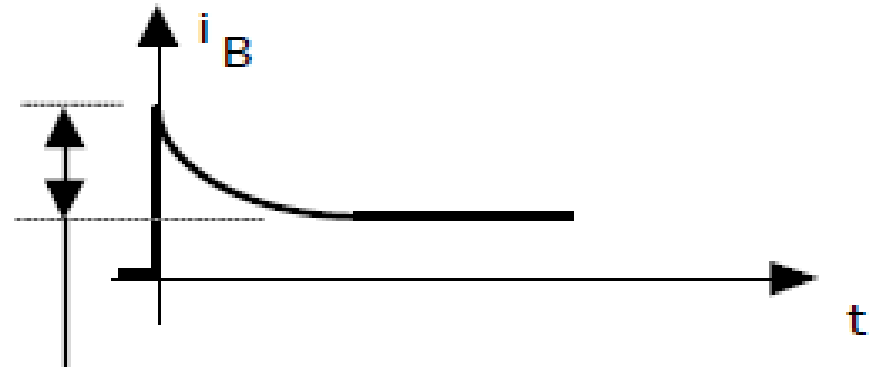
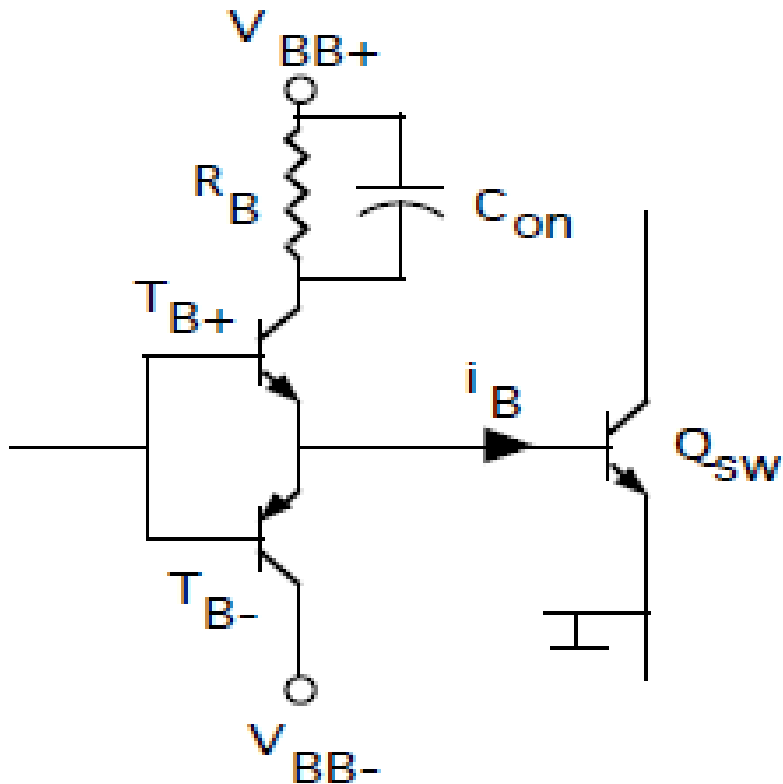
$$V_{CE(on)} = V_{BE(on)} > V_{CE(sat)}$$

- $D_{as}$  obezbeđuje put negativne struje baze  $Q_{sw}$  i njegovo efikasnije isključenje

-Vreme nagomilavanja (*storage time*) kod BJT kao i vreme isključenja (off) je na ovaj način značajno redukovano

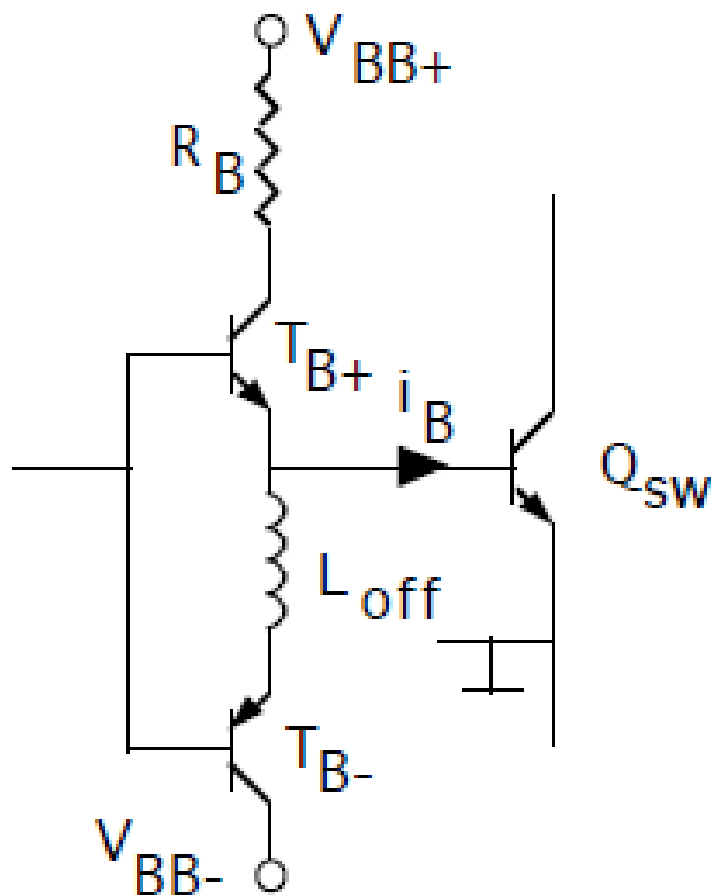
-Gubici u stanju vođenja (on-state) neznatno rastu

## ***SPEED-UP* KONDENZATOR ZA POBOLJŠANJE BRZINE RADA BJT**



TRANZIJENT U PORASTU  
BAZNE STRUJE STRUJE  
OBEZBEĐEN PREKO  
KONDENZATORA  
 $C_{on}$ .  
OVIM JE OBEZBEĐENO  
SMANJENJE  
VREMENA UKLJUČENJA  
ENERGETSKOG PREKIDAČA  
 $Q_{sw}$

## KONTROLA PROMENE BAZNE STRUJE KOD ISKLJUČENJA



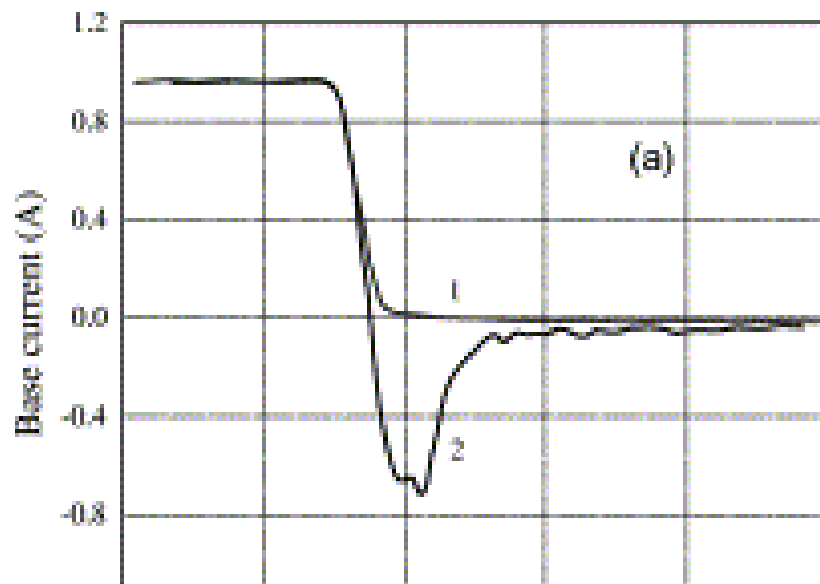
Ukoliko je suviše mala vrednost

$$di_B(off)/dt$$

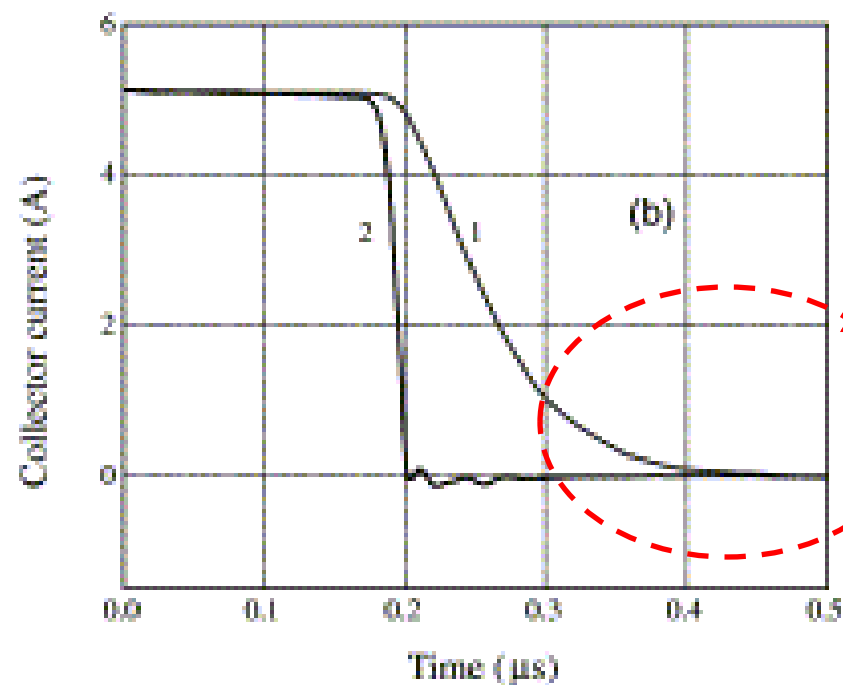
pri isključenju  $Q_{sw}$  pri velikim strujama kolektora, može doći do produženja vremena isključenja BJT, odnosno po pojave “strujnog repa” (current tail) u struji kolektora.

Induktivnost  $L_{off}$  značajno ograničava

$$di_B(off)/dt \xrightarrow{\text{na}} -V_{BB}/L_{off}$$



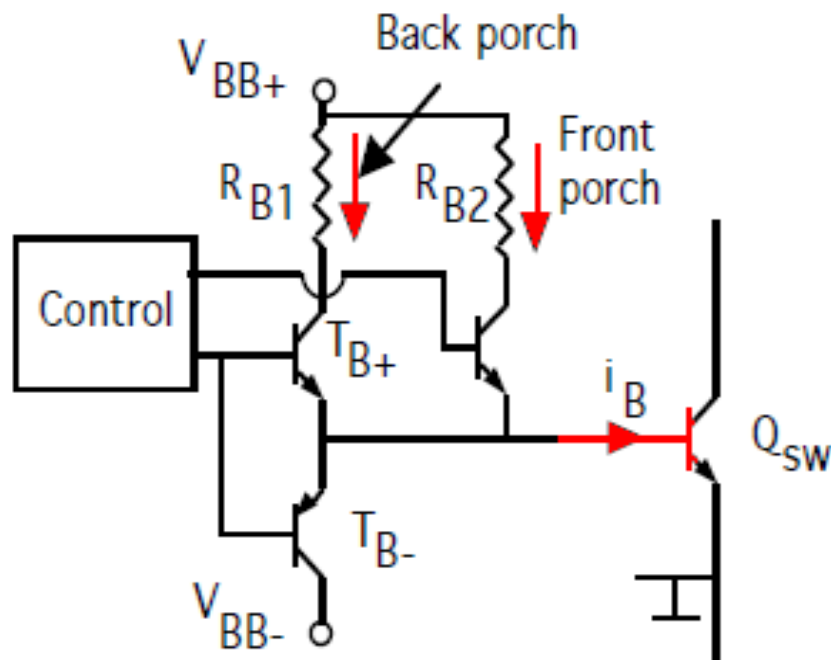
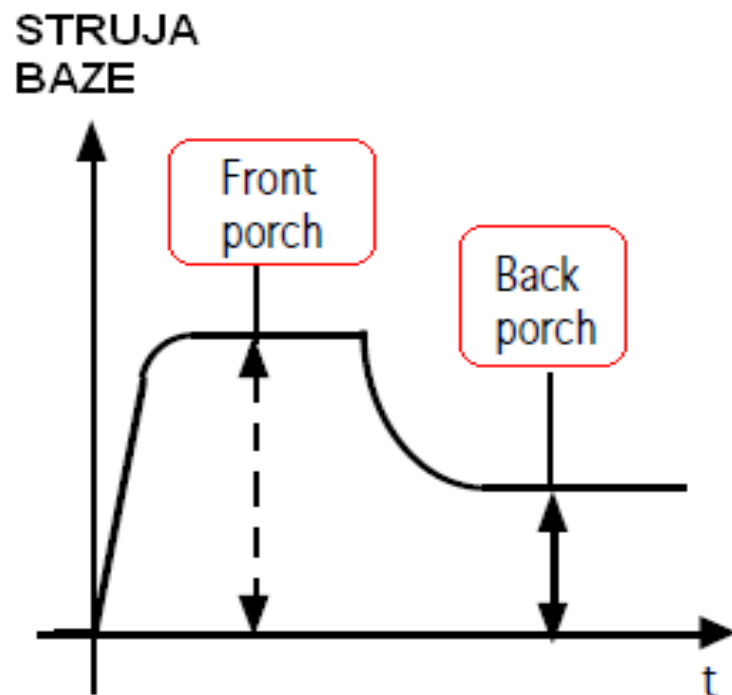
UTICAJ STRUJE BAZE I INVERZNE STRUJE BAZE (a) NA TRAJANJE ISKLJUČENJA BJT, ODNOSNO NA OPADANJE KOLEKTORSKE STRUJE (b) BJT



“current tail”

“strujni rep” značajno veći za slučaj (1)

**“FRONT PORCH”** i **“BACK-PORCH”** bazna struja BJT za poboljšanje njegovog uključenja

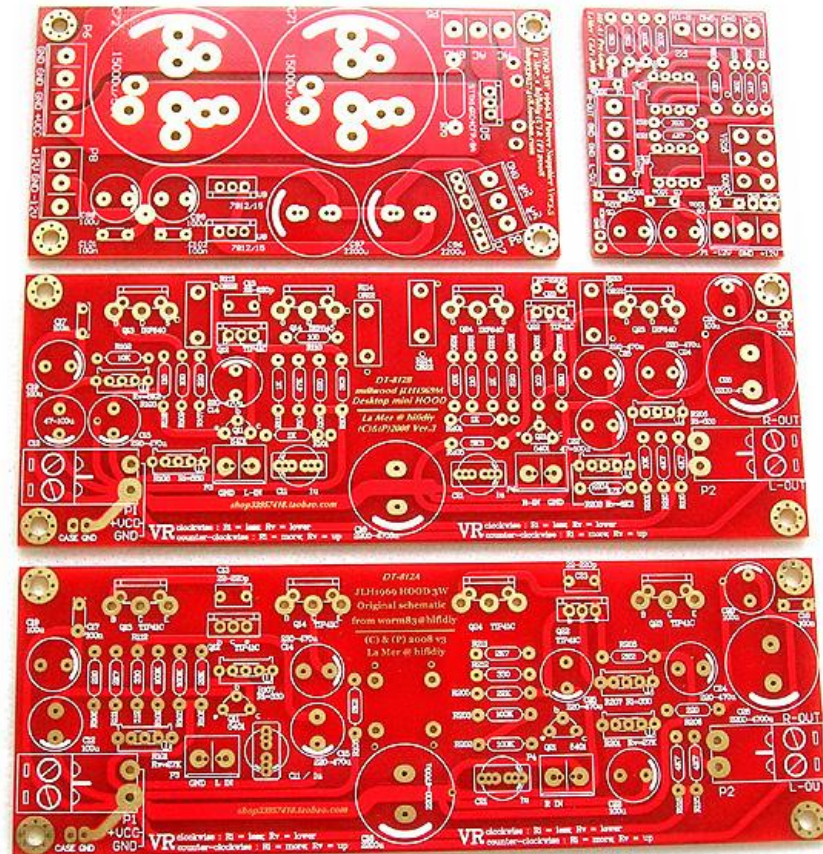


Bazna struja sa dva nivoa (prednji i zadnji). Na proces uključenja  $Q_{sw}$  ima značajan uticaj prednji nivo (front porch).

Brzo uključenje  $Q_{sw}$ , podrazumeva duboko zasićenje u ON-STATE, tako da će kašnjenje kod isključenja  $Q_{sw}$  biti značajno povećano!!!!!!

# HVALA NA PAŽNJI!!!

## PITANJA?????



JANUAR 2020