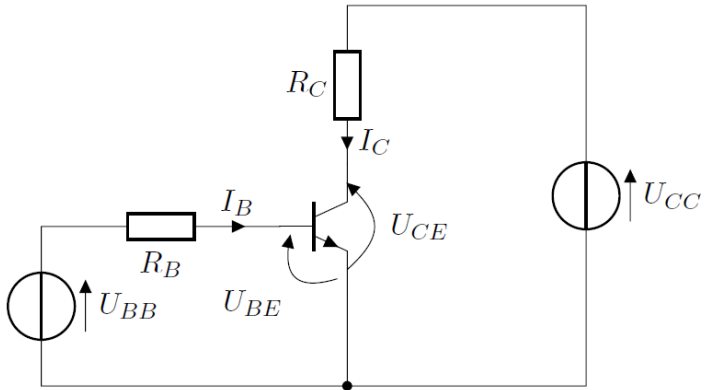
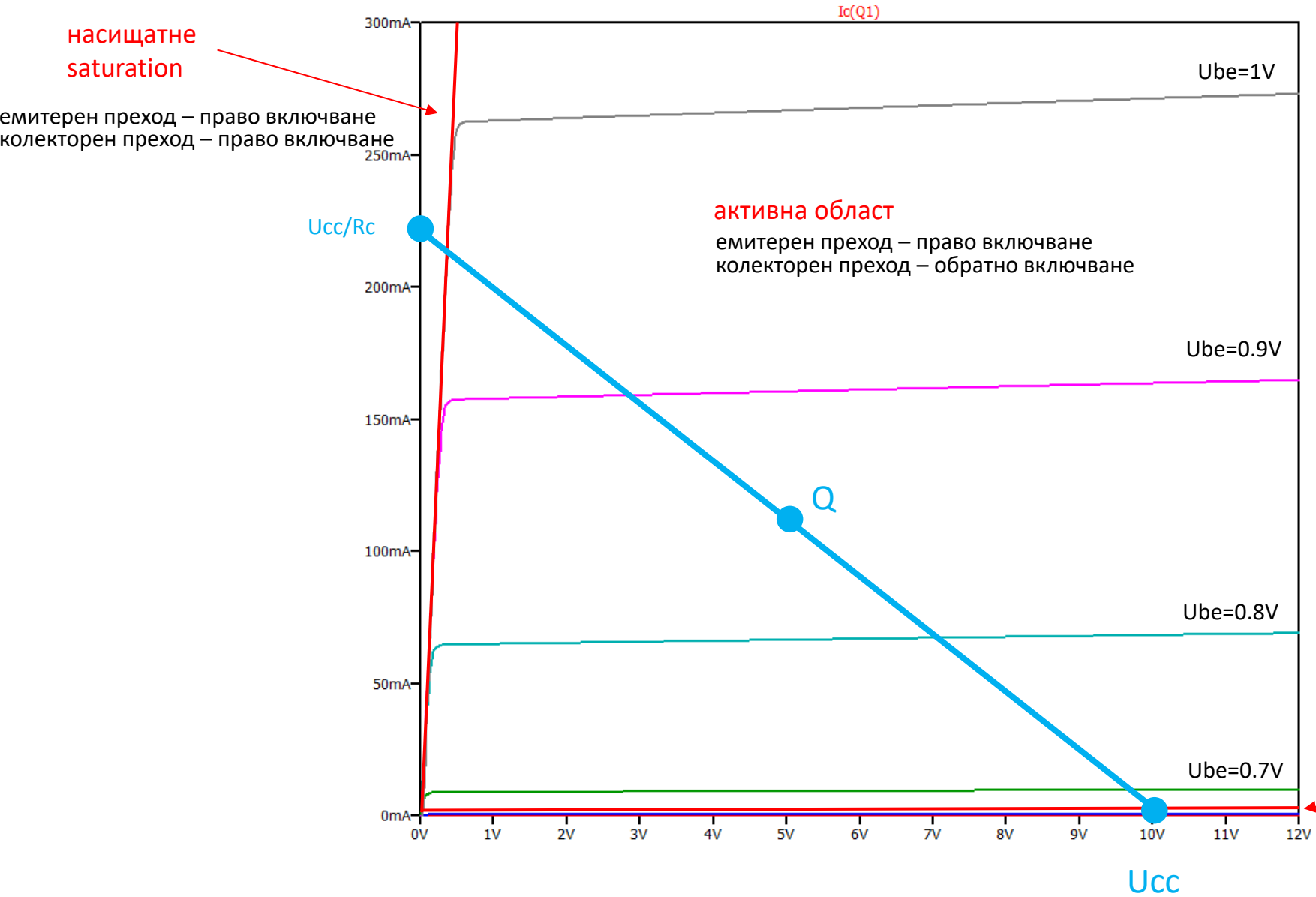




Работа на биполярен транзистор като ключ

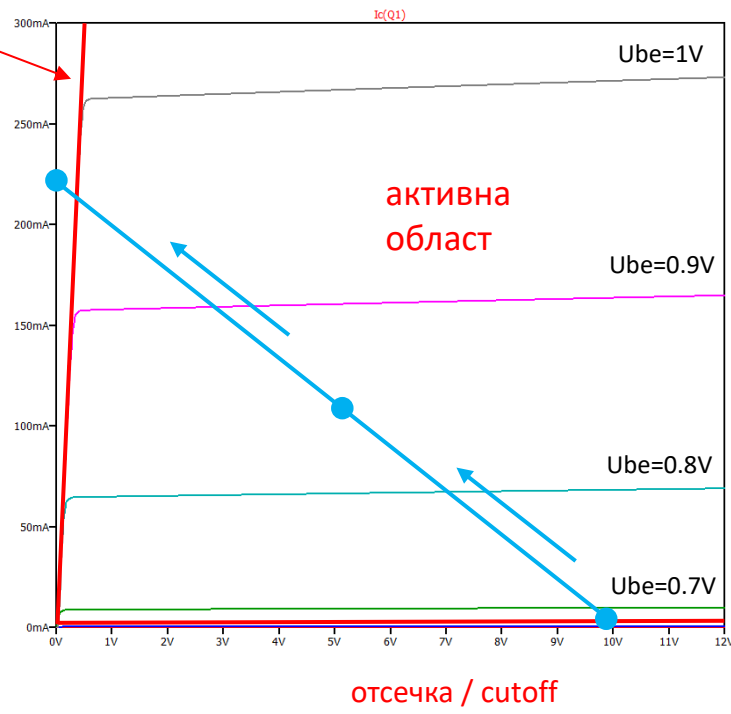
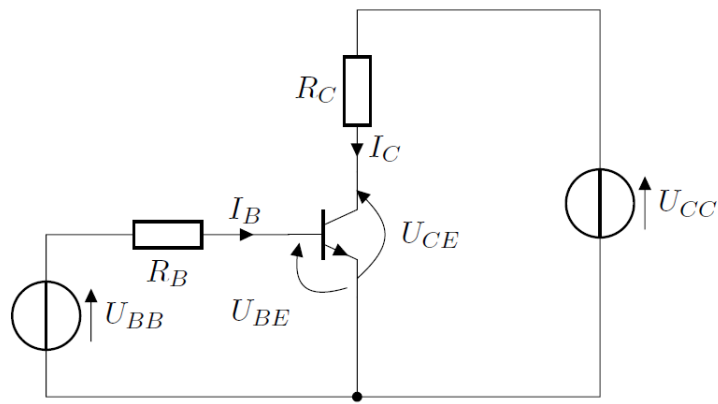
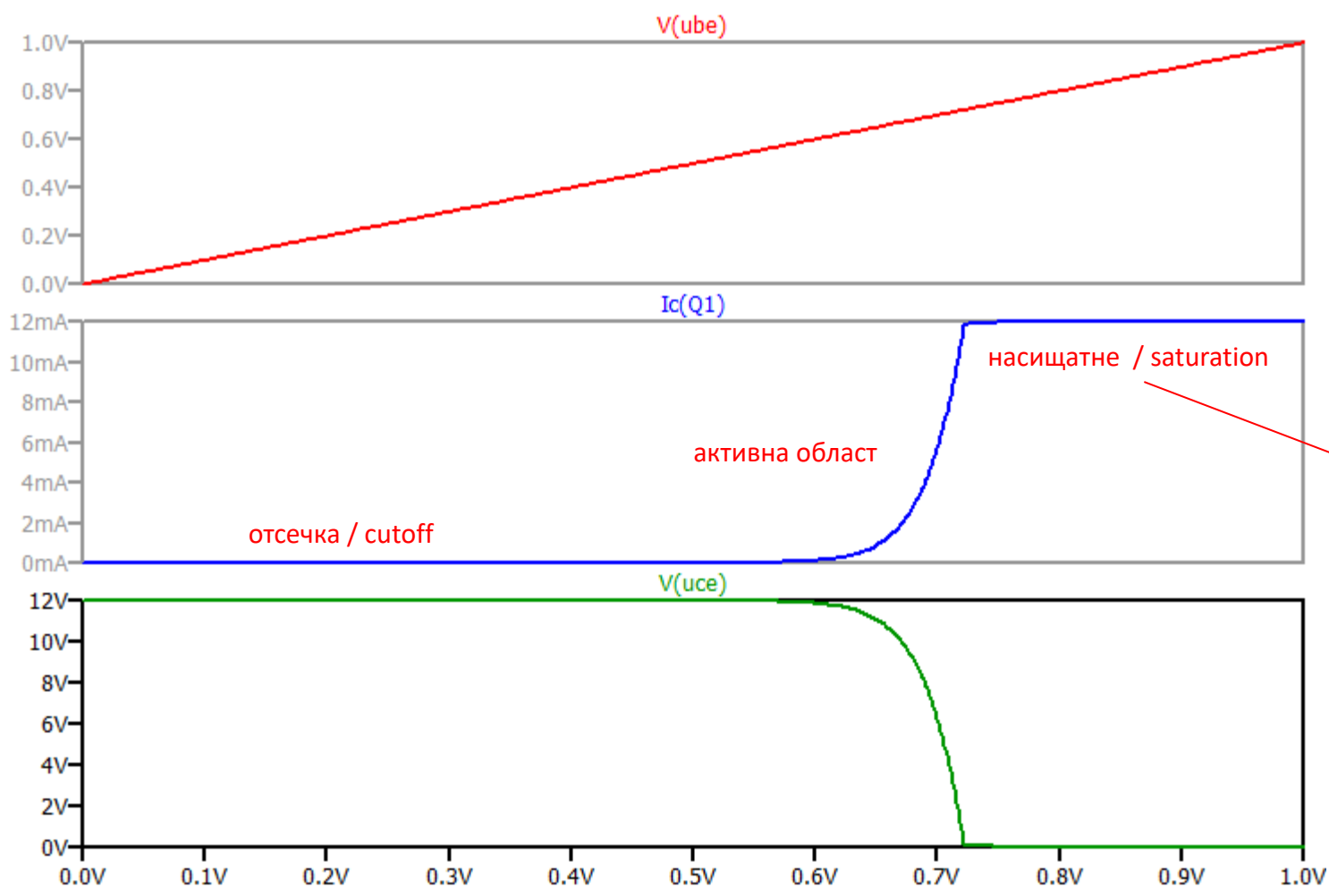
# Режими на работа на биполярен транзистор



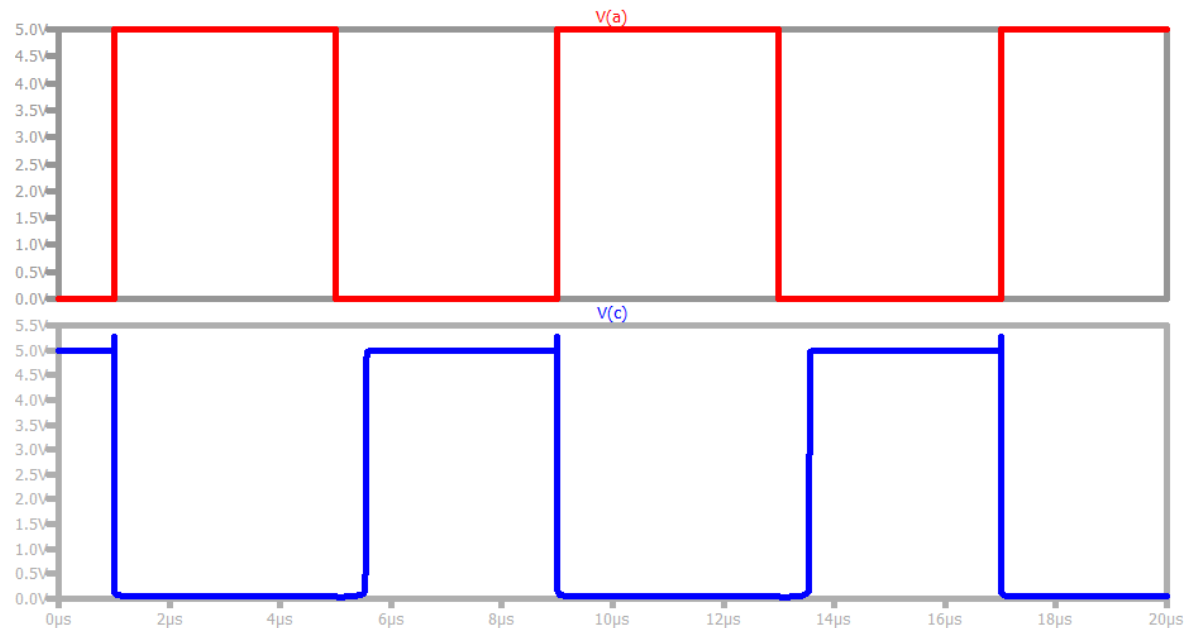
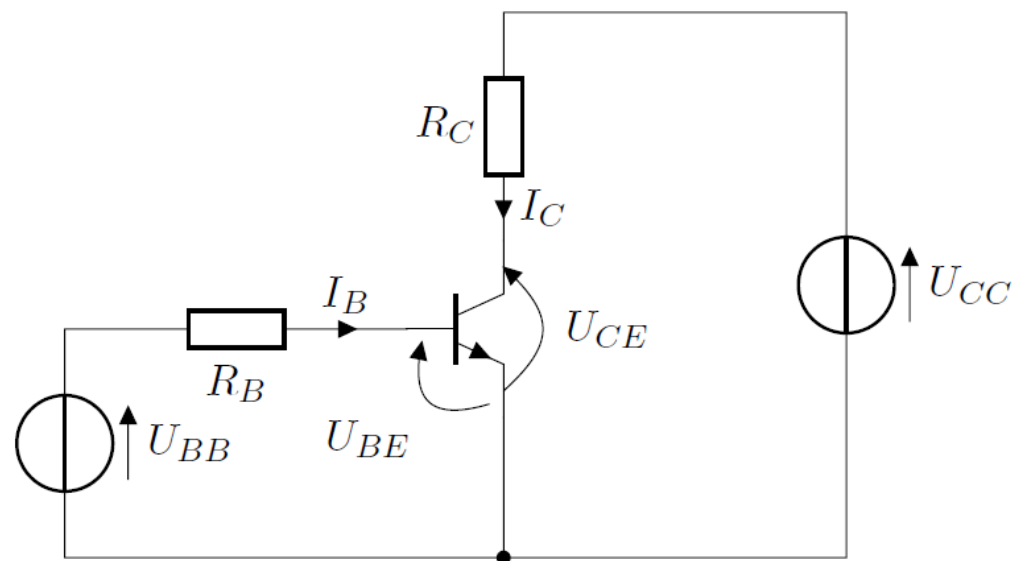
**отсечка / cutoff**

емитерен преход – обратно включване  
колекторен преход – обратно включване

# Режими на работа на биполярен транзистор



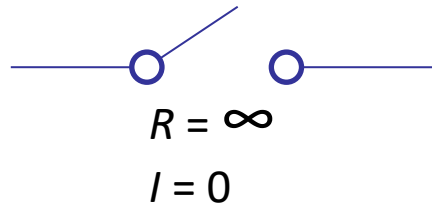
# Ключ общ емитер



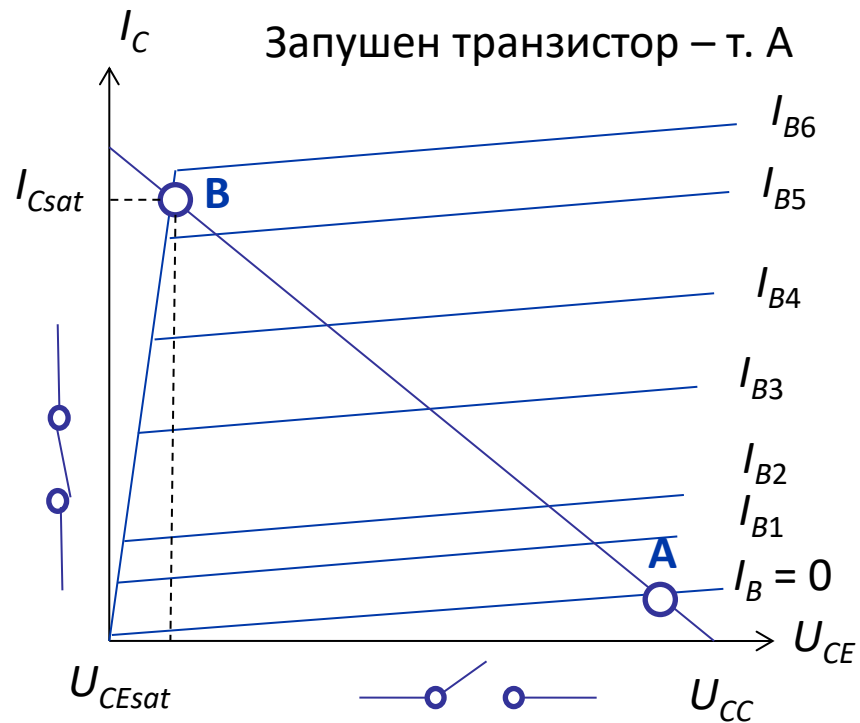
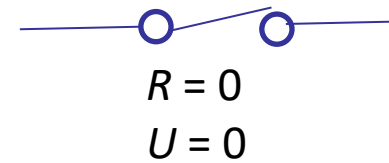
Състоянието на ключа се определя от амплитудата на входния импулс.

# Крайни състояния на ключа

Отворен



Затворен

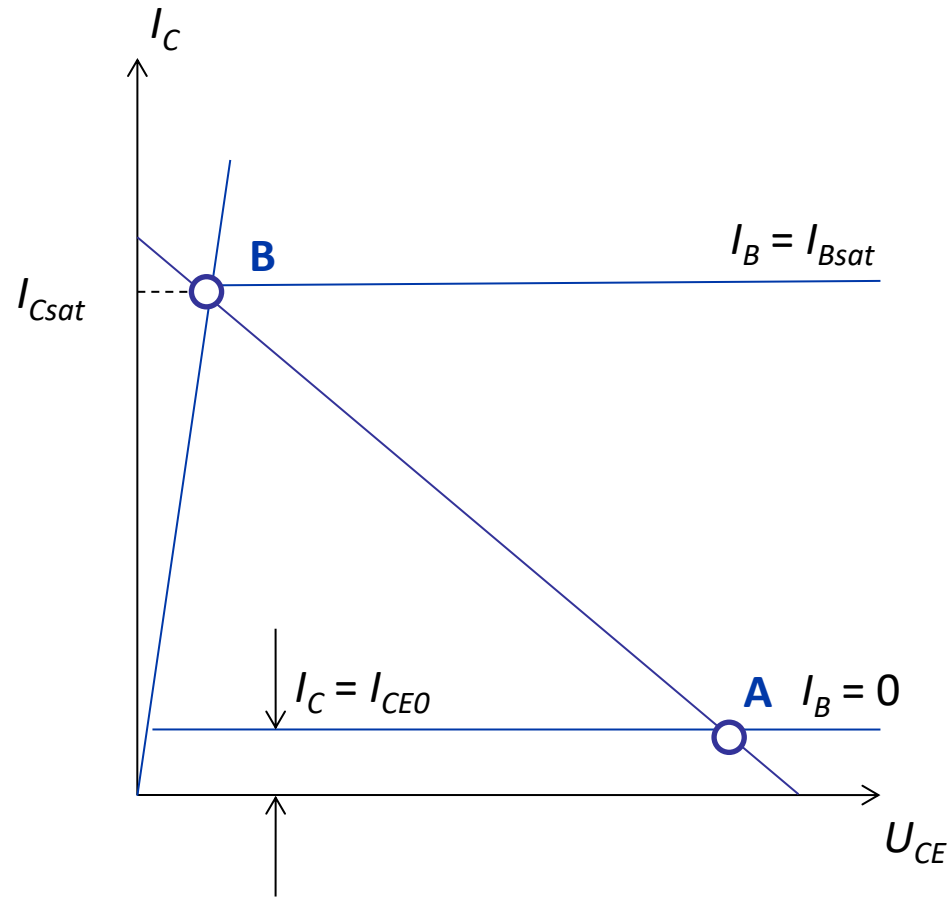


Наситен транзистор – т. В

В двете крайни състояния на ключа транзисторът е пасивен елемент и не може да се управлява.

При превключване работната точка се движи по **товарната права**, изминавайки всички точки между т. А и т. В

# Режим на отсечка



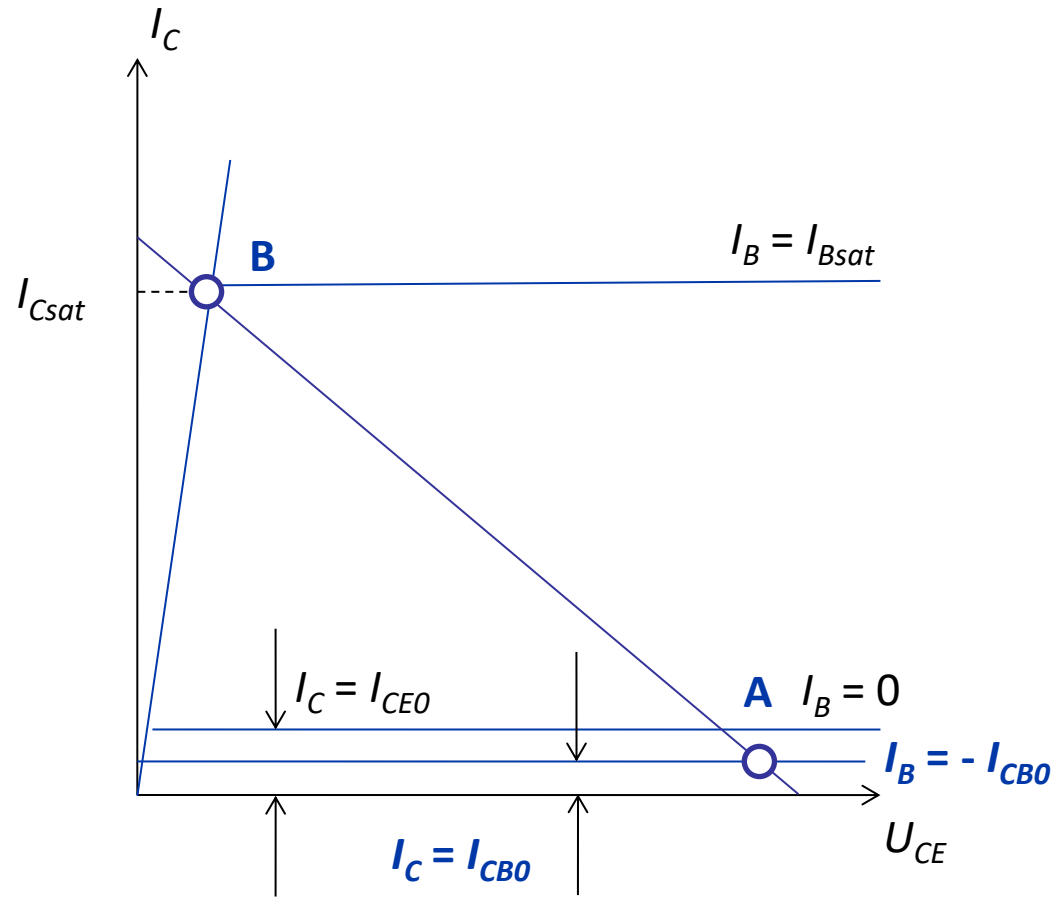
Режим на отсечка

$$I_C = \beta \cdot I_B + (1 + \beta) \cdot I_{CB0}$$

Ако  $I_B = 0$

$$I_C = (1 + \beta) I_{CB0} = I_{CE0}$$

# Режим на дълбока отсечка

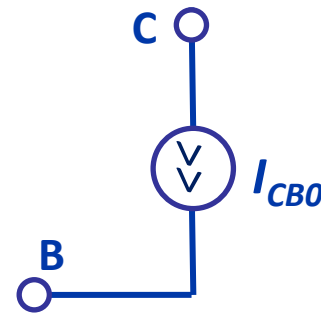


$$I_C = \beta \cdot I_B + (1 + \beta) \cdot I_{CB0}$$

Ако  $I_B = I_{CB0}$

$$I_C = I_{CB0}$$

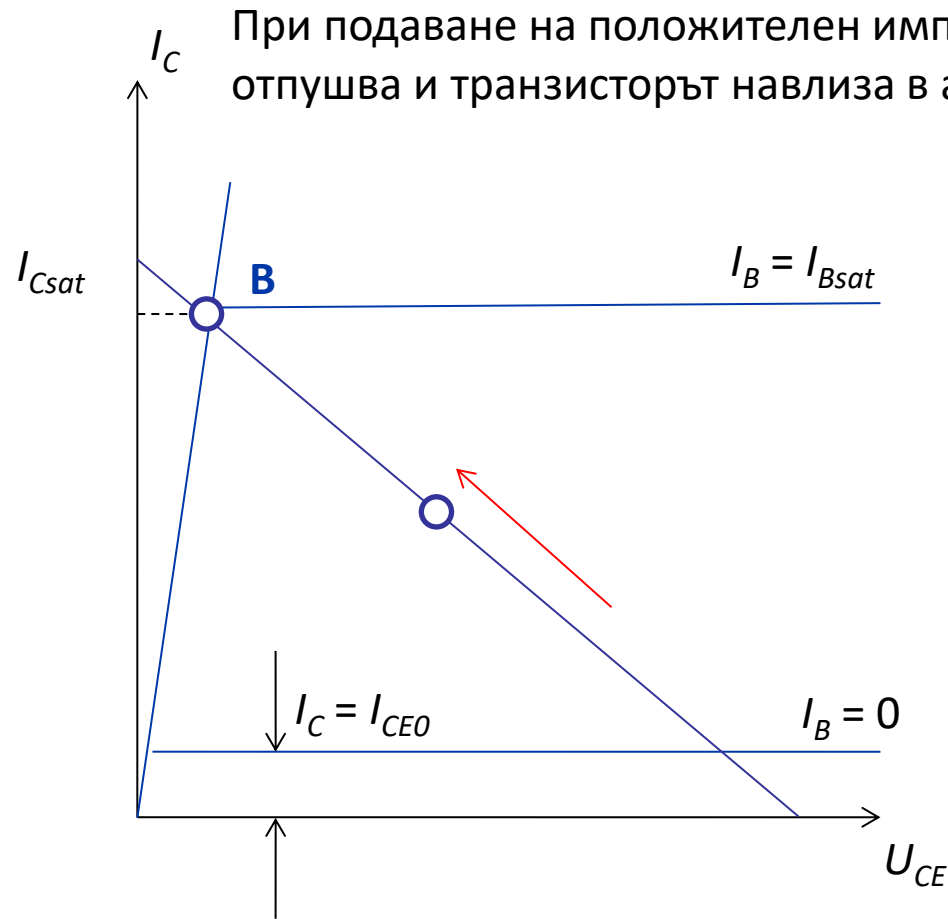
Режим на  
дълбока отсечка  
– т. А



Еквивалентна  
схема в режим на  
отсечка

Режим на дълбока отсечка

# Активен режим



При подаване на положителен импулс на входа  $u_{IN} > 0.7V$ , емитерният преход се отпушва и транзисторът навлиза в активен нормален режим.

С нарастване на входното напрежение работната точка се движи по товарната права.

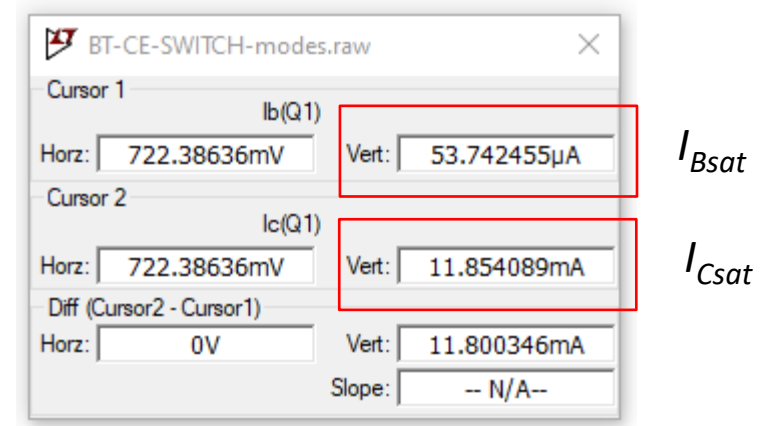
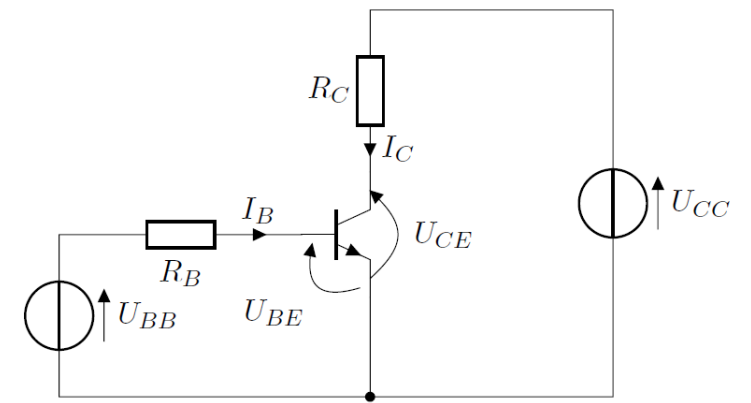
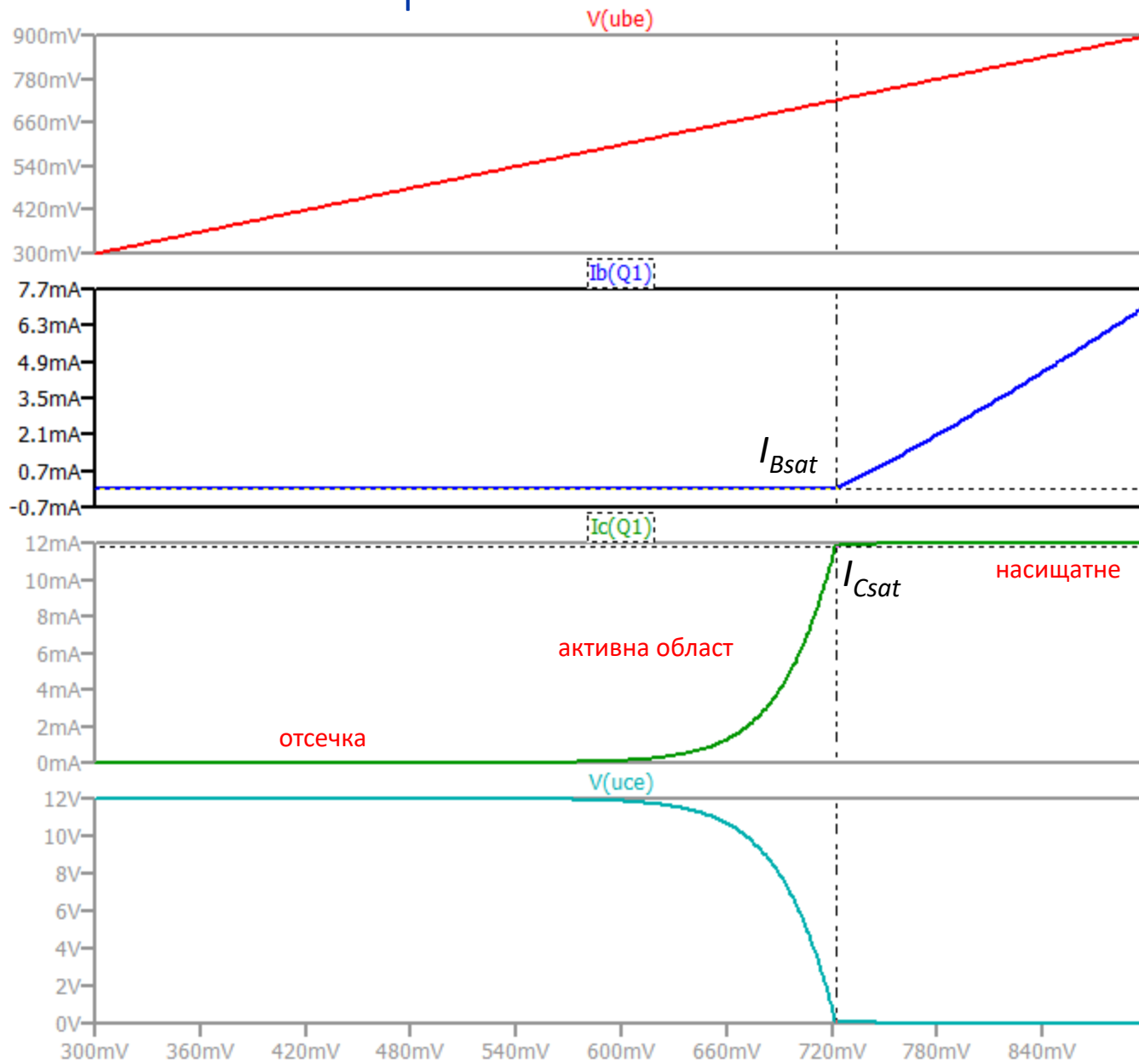
Моментните стойности на токовете в базата и колектора са съответно:

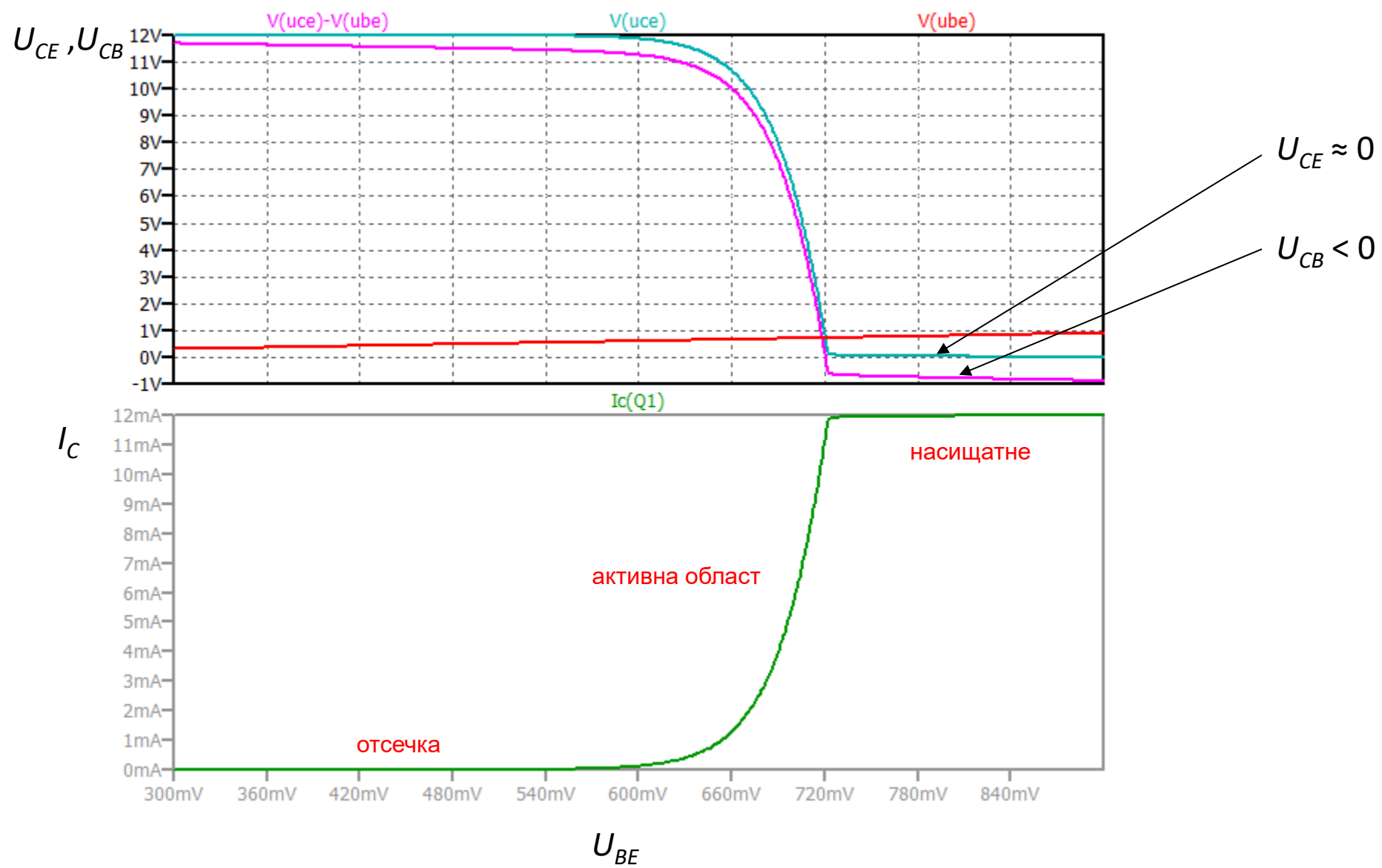
$$i_B = \frac{u_{IN} - u_{BE}}{R_B}$$

$$i_C = \beta i_B = \beta \frac{u_{IN} - u_{BE}}{R_B}$$



# Режим на насищане





# Режим на насищане

В режим на насищане **двата прехода се включват в права посока**. Те инжектират токоносители в базата и напрежението  $U_{CEsat} \approx 0$ . Реално  $U_{CEsat} \approx 0,1 \div 0,4 \text{ V}$  (виж следващият слайд).

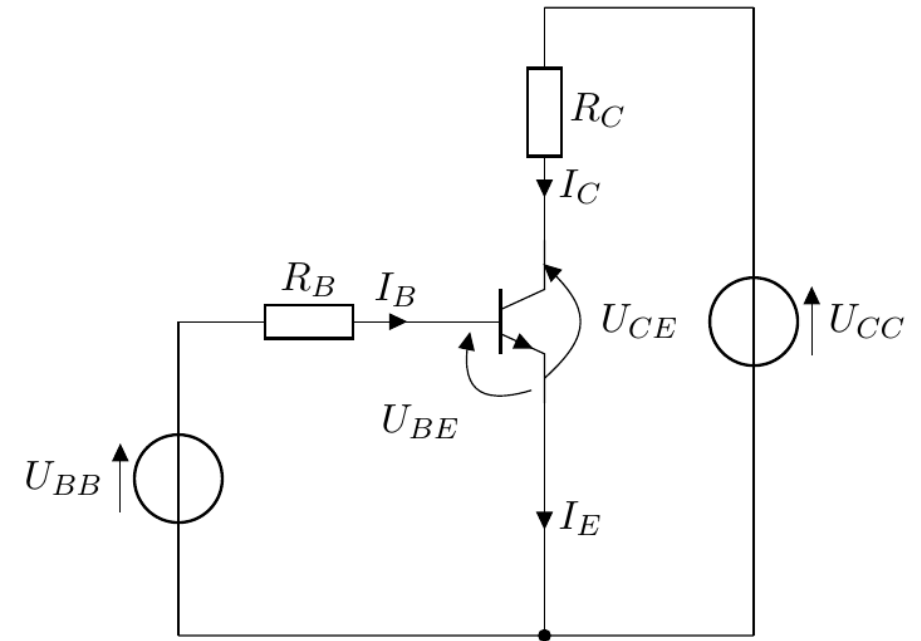
Колекторният ток в режим на насищане е

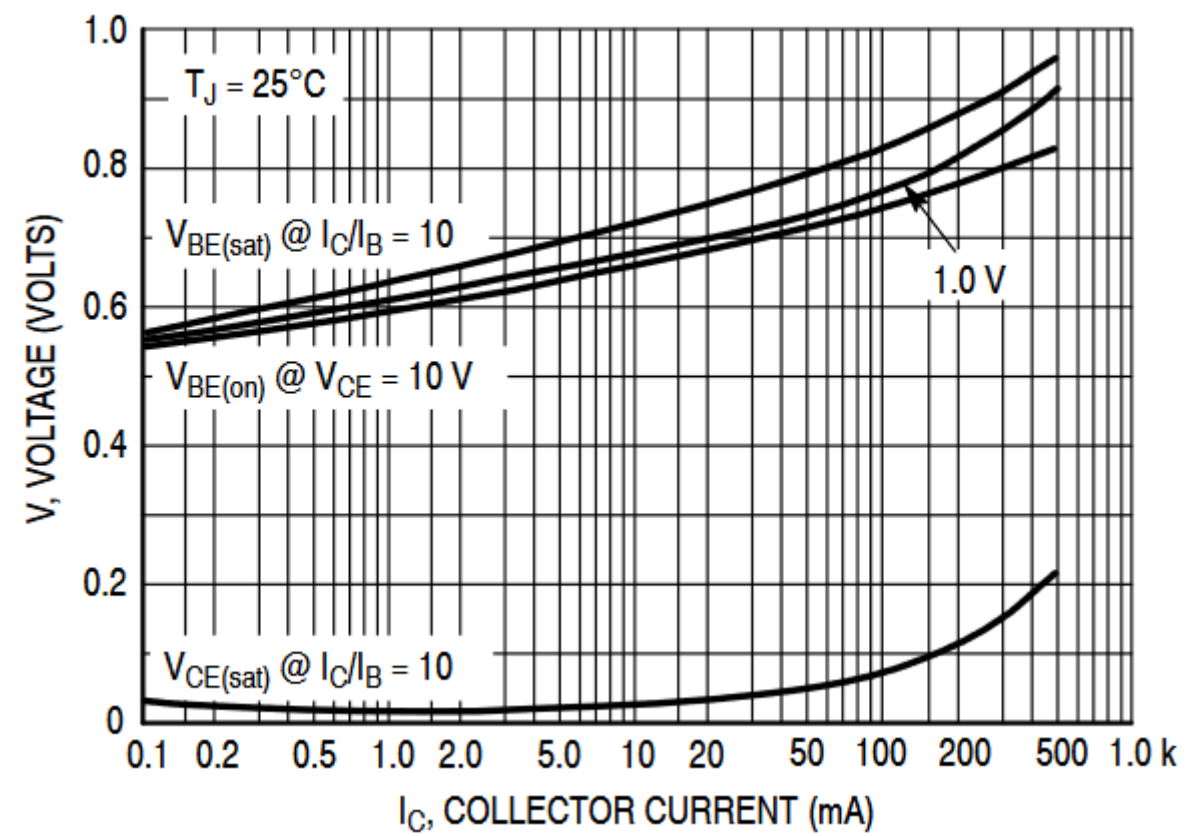
$$I_{Csat} = \frac{U_{CC} - U_{CEsat}}{R_C} \approx \frac{U_{CC}}{R_C}$$

$I_{Csat}$  не зависи от транзистора

Токът на базата в режим на насищане е

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta}$$





# Условие за настъпване на насищане

Условието транзисторът да навлезе в режим на насищане е **базисният ток да е по-голям от базисния ток на насищане**.

$$I_B > I_{Bsat} \quad \text{Тогава } I_C = I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C}$$

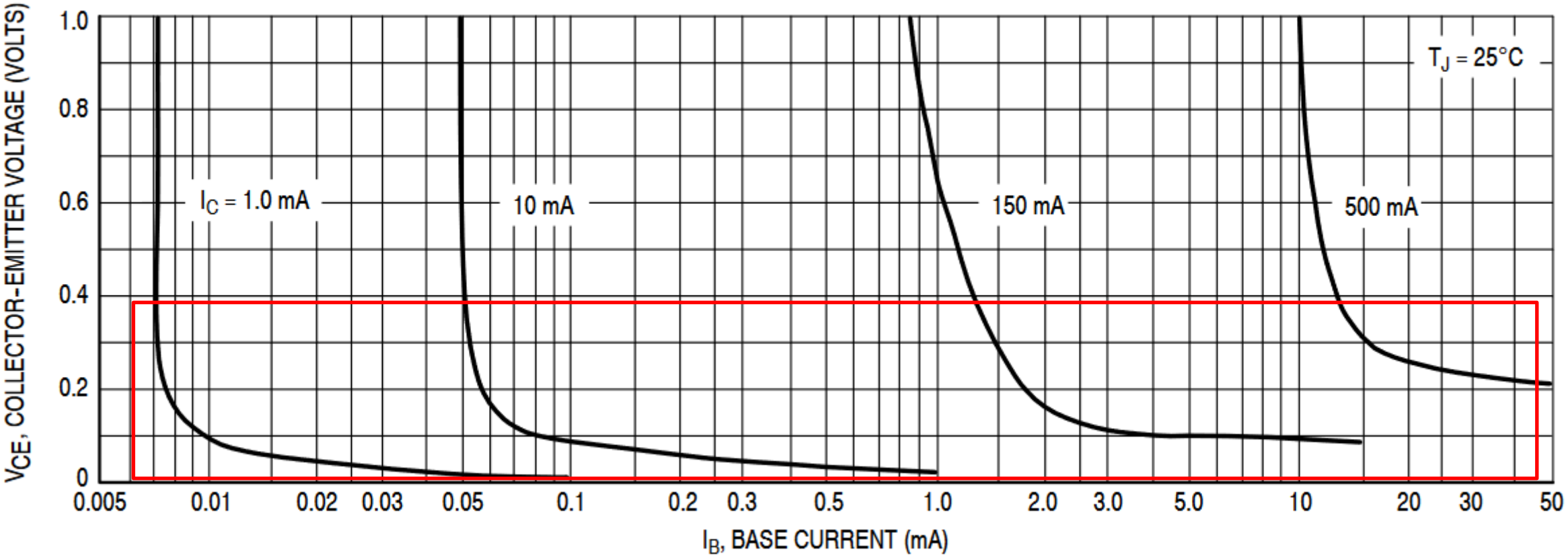
При  $I_B > I_{Bsat}$  се сменя поляритета на напрежението  $U_{CB}$  и двата прехода се включват в права посока. В режим на насищане **не важи условието**  $I_C = \beta \cdot I_B$ .

Насищане може да настъпи при много малки токове, тъй като то не зависи от големината на тока, а от **съотношението** между токовете  $I_B$  и  $I_{Bsat}$ .

## Степен на насищане

$$N = \frac{I_B}{I_{Bsat}} \quad I_B > I_{Bsat} \quad N = 2 \div 5$$

# Collector saturation region



насищане

# Определяне на режима, $I_C$ и $U_{CE}$

## Алгоритъм за решаване

- 1) Ако  $U_{BB} < 0.7V$  Транзисторът е **запушен**  $\rightarrow$   
 $I_B = 0, I_C = \beta I_B = 0, U_{CE} = U_{CC}$

С това задачата е решена.

- 2) Ако  $U_{BB} > 0.7V$  Транзисторът е **отпушен (\*)**.  
Необходимо е да се определи режима – активен или насищане.

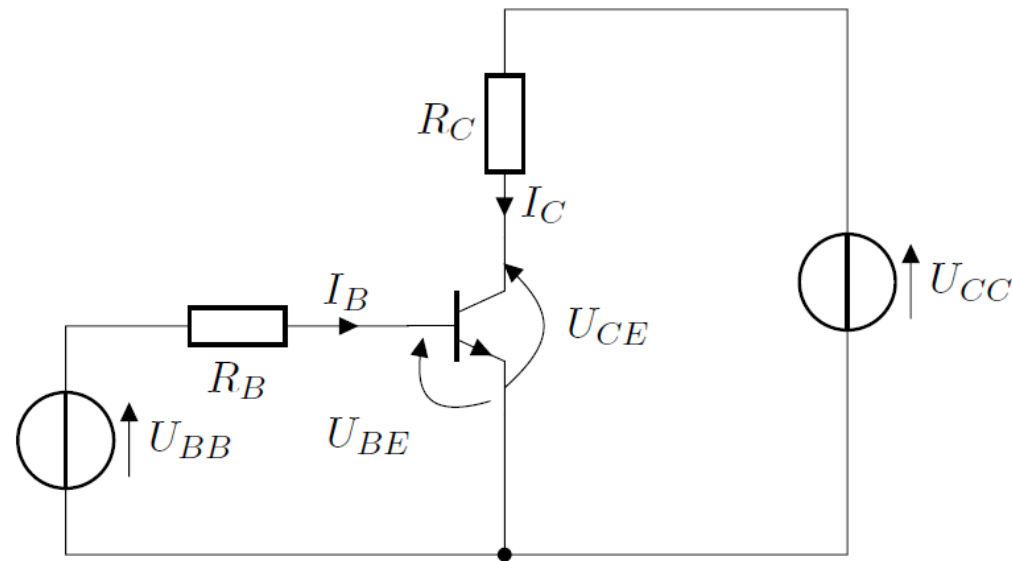
- 3) Проверка на режима

Изчисляват се  $I_B$  и  $I_{Bsat}$

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} \quad I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} \quad I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C}$$

- 4) Ако  $I_B \leq I_{Bsat} \rightarrow$  Активен режим  $\rightarrow I_C = \beta \cdot I_B$  и  $U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C$

- 5) Ако  $I_B > I_{Bsat} \rightarrow$  Режим на насищане  $\rightarrow I_C = I_{Csat}$  и  $U_{CE} = U_{CC} - I_{Csat} \cdot R_C = 0V$



(\*) Това предположение е валидно ако  $R_B$  не е твърде голямо – например стотици мега Ома.

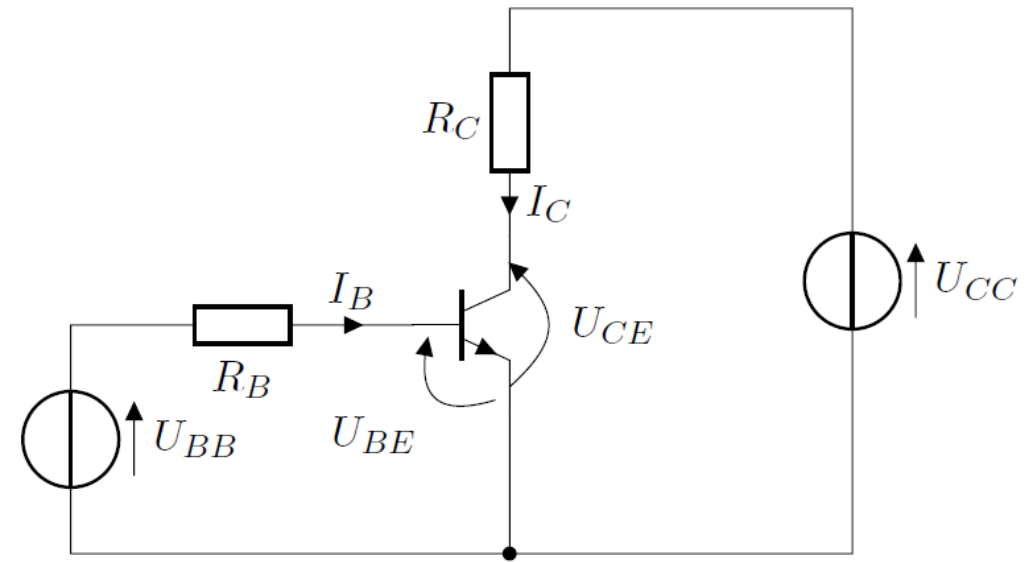
# Задачи за постоянно-токов режим

Проверка за отпушен транзистор.

$U_{BB} = 400\text{mV} = 0,4\text{V} < 0,7\text{V}$  Следователно транзисторът е **запушен**.

$$I_B = 0 \quad I_C = \beta \cdot I_B = 0,$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C = U_{CC} - 0 \cdot R_C = U_{CC} = 12\text{V}$$



$$U_{BB} = 400\text{mV}, U_{CC} = 12\text{V}$$

$$R_C = 1\text{k}, R_B = 100\text{k}$$

$$\beta = 100$$

---

$$I_C = ?, U_{CE} = ?$$



# Задачи за постоянно-токов режим

Проверка за отпушен транзистор.

$U_{BB} = 5,7V > 0.7V$  Следователно транзисторът е **отпушен**.

Правим проверка за режима – активен или насищане

Изчисляват се  $I_B$  и  $I_{Bsat}$

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{5,7 - 0,7}{100 \cdot 10^3} = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0,05 \text{ mA}$$

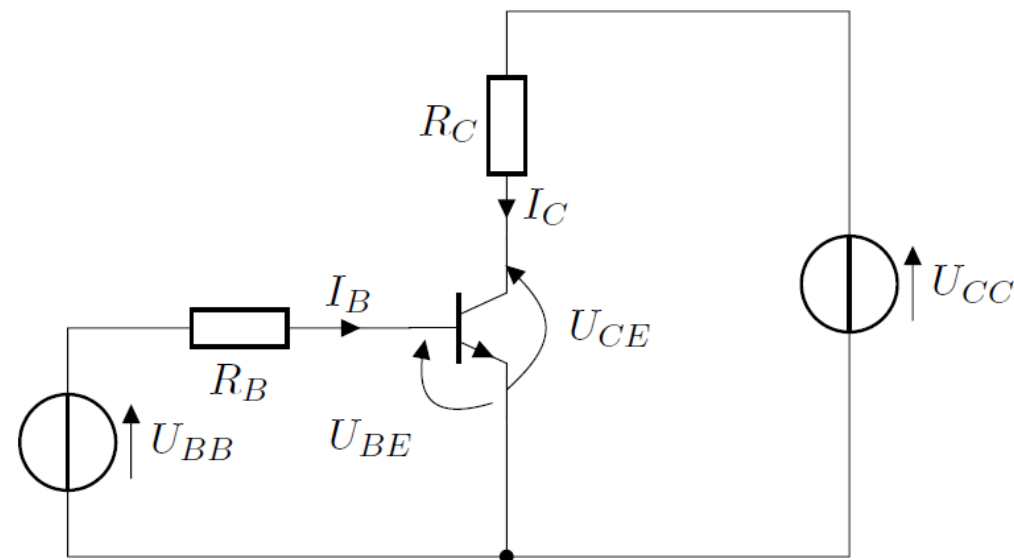
$$I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C} \quad I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{U_{CC}}{R_C \beta}$$

$$I_{Bsat} = \frac{U_{CC}}{R_C \beta} = \frac{12}{1 \cdot 10^3 \cdot 120} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0,1 \text{ mA}$$

$I_B < I_{Bsat}$  – **Активен режим**

$$I_C = \beta \cdot I_B = 120 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 6 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C = 12 - 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3 = 6 \text{ V}$$



$$U_{BB} = 5,7V, U_{CC} = 12V$$

$$R_C = 1k, R_B = 100k$$

$$\beta = 120$$

---

$$I_C = ?, U_{CE} = ?$$

# Задачи за постоянно-токов режим

Проверка за отпушен транзистор.

$U_{BB} = 4,7V > 0.7V$  Следователно транзисторът е **отпушен**.

Правим проверка за режима – активен или насищане

Изчисляват се  $I_B$  и  $I_{Bsat}$

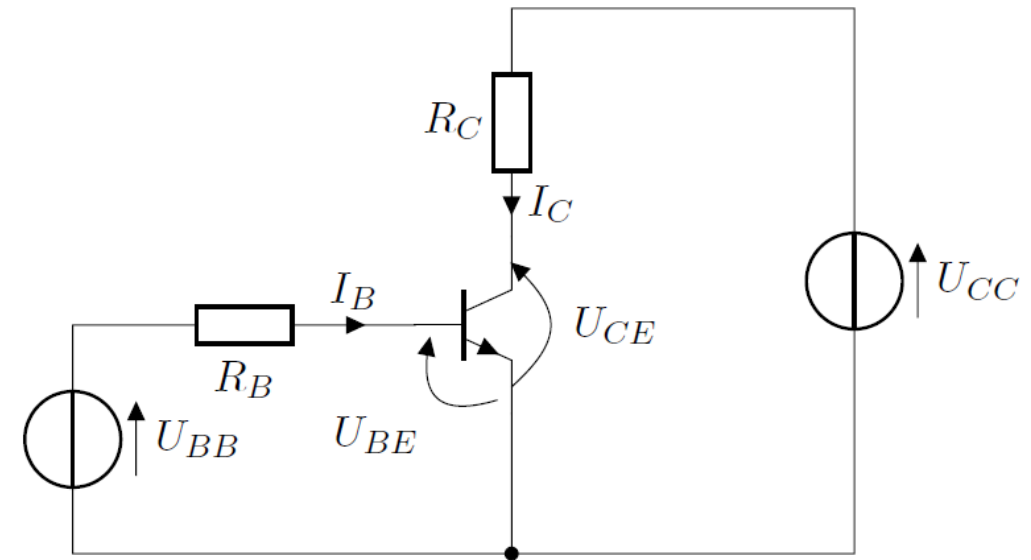
$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{4.7 - 0.7}{10 \cdot 10^3} = 0,4 \cdot 10^{-3} A = 0,4 \text{ mA}$$

$$I_{Bsat} = \frac{U_{CC}}{R_C \beta} = \frac{6}{1 \cdot 10^3 \cdot 60} = 0,1 \cdot 10^{-3} A = 0,1 \text{ mA}$$

$I_B > I_{Bsat}$  – **Насищане**

$$I_C = I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C} = 6 \cdot 10^{-3} A = 6 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C = 6 - 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3 = 0V$$



$$U_{BB} = 4,7V, U_{CC} = 6V$$

$$R_C = 1k, R_B = 10k$$

$$\beta = 60$$

---

$$I_C = ?, U_{CE} = ?$$

# Задачи за постоянно-токов режим

$U_B > 0,7V \therefore$  транзисторът е отпушен

$$I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{6}{500} = 0,012A = 12mA$$

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{300} = 4 \cdot 10^{-5} = 40\mu A$$

От закона на Кирхоф за входната верига

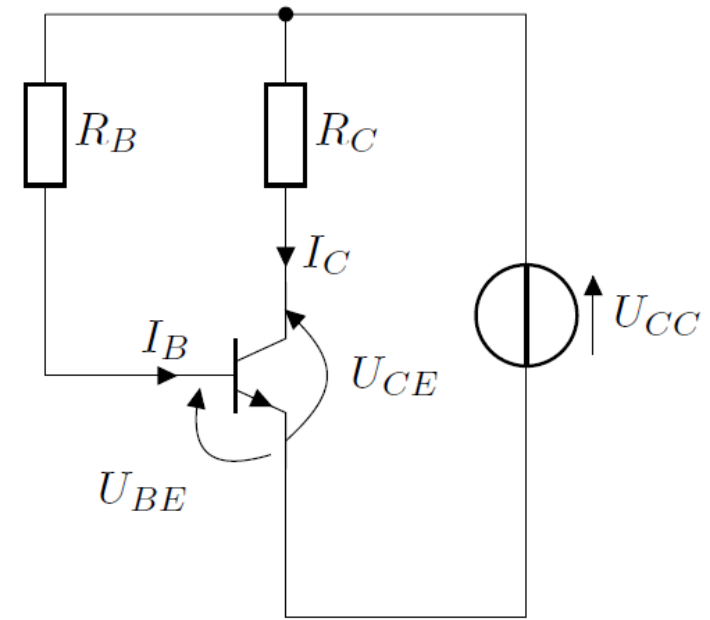
$$U_{CC} = I_B \cdot R_B + U_{BE}$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \frac{6 - 0,7}{100 \cdot 10^3} = \frac{5,3}{1 \cdot 10^5} = 5,3 \cdot 10^{-5} = 53\mu A$$

$I_B > I_{Bsat} \therefore$  транзисторът е в режим на насищане

$$\therefore I_C = I_{Csat} = 12mA$$

$$\therefore U_{CE} = 0V$$



$$U_{CC} = 6V$$

$$R_C = 500, R_B = 100k$$

$$\beta = 300$$

---

$$I_B = ?, I_C = ?, U_{CE} = ?$$

# Задачи за постоянно-токов режим

$$U_B = \frac{U_{CC} \cdot R_{B2}}{(R_{B1} + R_{B2})} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 10^3}{(47 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3)} = 1,75 \text{ V} > 0,7 \text{ V} \rightarrow \text{транзисторът е отпушен}$$

$$I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{6}{500} = 0,012 \text{ A} = 12 \text{ mA}$$

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{1,75 \cdot 10^{-3}}{100} = 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 17,5 \text{ }\mu\text{A}$$

$$U_E = U_B - U_{BE} = 1,75 - 0,7 = 1,05 \text{ V} \approx 1 \text{ V}$$

$$U_E = I_E \cdot R_E$$

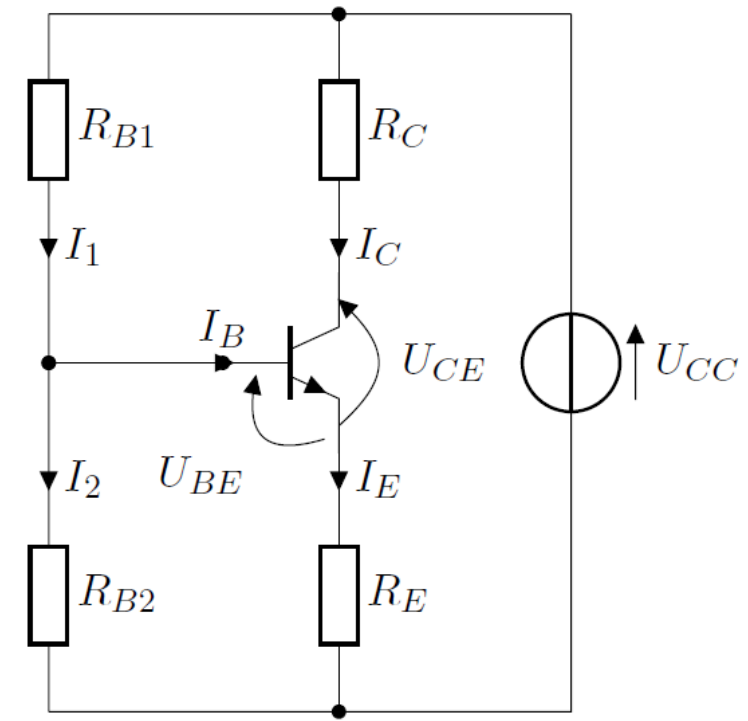
$$I_E = \frac{1}{1 \cdot 10^3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

$$I_E \approx I_C = 1 \text{ mA}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{100} = 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 10 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_B < I_{Bsat} \rightarrow \text{Активен режим}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - I_E R_E = 10 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot 4,7 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3 = 10 - 5,7 = 4,3 \text{ V}$$



$$U_{CC} = 10 \text{ V}$$

$$R_C = 4,7 \text{ k}, R_{B1} = 47 \text{ k}, R_{B2} = 10 \text{ k}, R_E = 1 \text{ k}$$

$$\beta = 100$$

---

$$I_B = ?, I_C = ?, U_{CE} = ?$$

# Задачи за постоянно-токов режим

Да се определи максималната стойност на  $R_B$ , при която транзисторът от фигурата ще работи в режим на насищане.

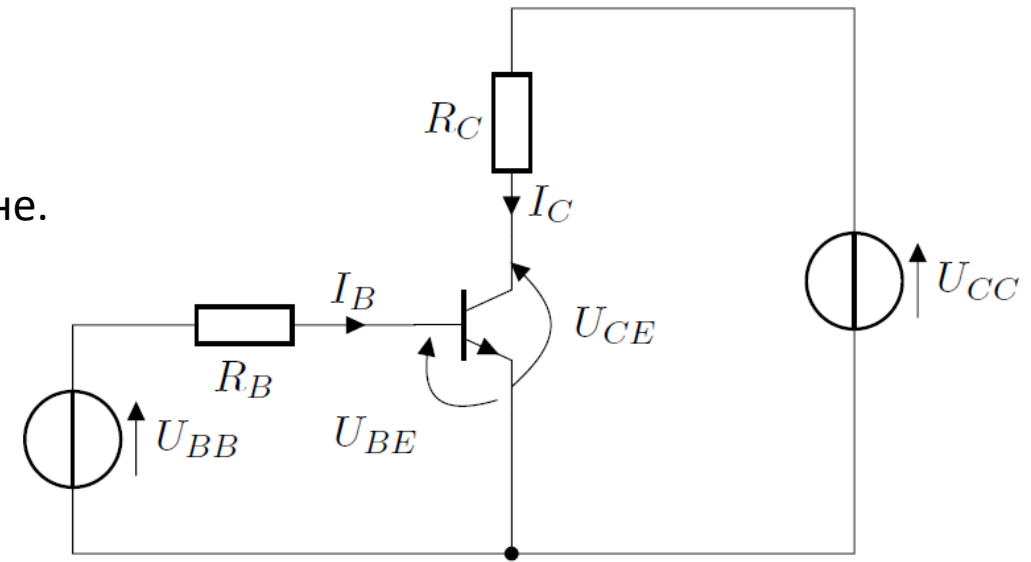
Условие за насищане  $I_B > I_{Bsat}$

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} > I_{Bsat} = \frac{U_{CC}}{R_C \beta}$$

$$\frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} > \frac{U_{CC}}{R_C \beta}$$

$$R_B < \frac{(U_{BB} - U_{BE}) R_C \beta}{U_{CC}}$$

$$R_B < \frac{(6 - 0.7) 1 \cdot 10^3 \cdot 60}{12} < 26,5 \cdot 10^3 \Omega < 26,5 \text{ k}\Omega$$



$$U_{BB} = 6V, U_{CC} = 12V$$

$$R_C = 1k, \beta = 60$$

---

$$R_{Bmin} = ?$$

# Проектиране на ключ с биполярен транзистор

Дадени са следните величини:

- Захранване  $U_{CC}$
- Колекторен ток  $I_C$
- Входно напрежение  $U_{BB}$
- $U_{CE(sat)}$

Да се определят стойностите на  $R_C$  и  $R_B$

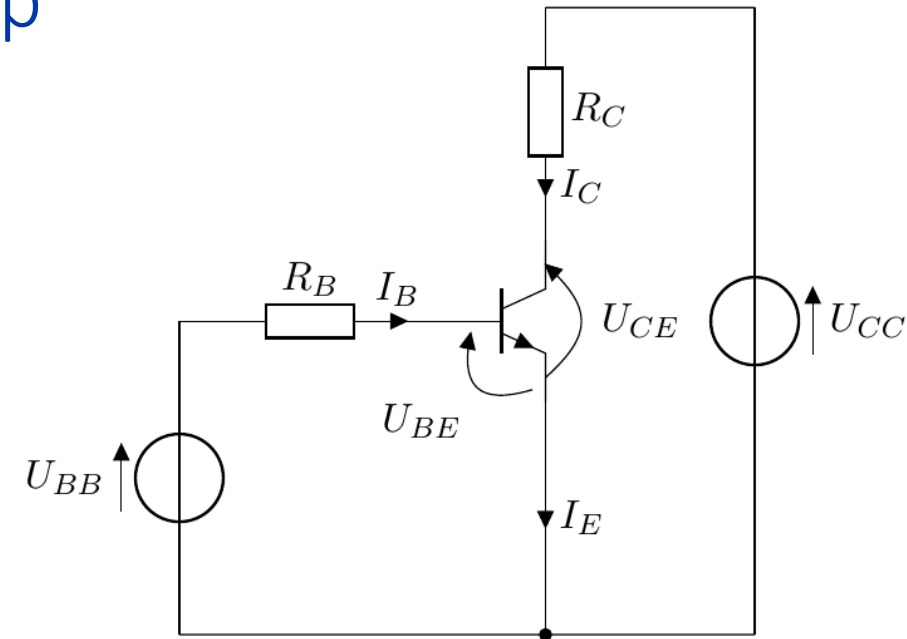
$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE(sat)}}{I_C}, \text{ където } U_{CE(sat)} \text{ се взема от каталог.}$$

За да е сигурно, че транзисторът е в режим на насищане, ще изберем базов ток десет пъти по-малък от колекторния (т.нар. „forced beta”)

При  $I_B = 0.1 I_C$  всеки транзистор с  $\beta > 10$  ще работи в режим на насищане.

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{I_C}{10}$$

$$R_B = \frac{10 \cdot (U_{BB} - U_{BE})}{I_C}$$



# Проектиране на ключ с биполярен транзистор - пример

Дадено:

- Транзистор PN2222A
- Захранване  $U_{CC}=10V$
- Колекторен ток  $I_C=10mA$
- Входно напрежение  $U_{BB}=5V$
- $U_{CE(sat)}$

Да се определят стойностите на  $R_C$  и  $R_B$

От каталог определяме  $U_{CE(sat)}=0.05V @ I_C=10mA$

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE(sat)}}{I_C} = \frac{10V - 0.05V}{10mA} = 0.995k\Omega.$$

За да е сигурно, че транзисторът е в режим на насищане, ще изберем базов ток десет пъти по-малък от колекторния  $I_B = 0.1 I_C = 1mA$

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

$$R_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{I_B} = \frac{5V - 0.7V}{1mA} = 4.3k\Omega$$

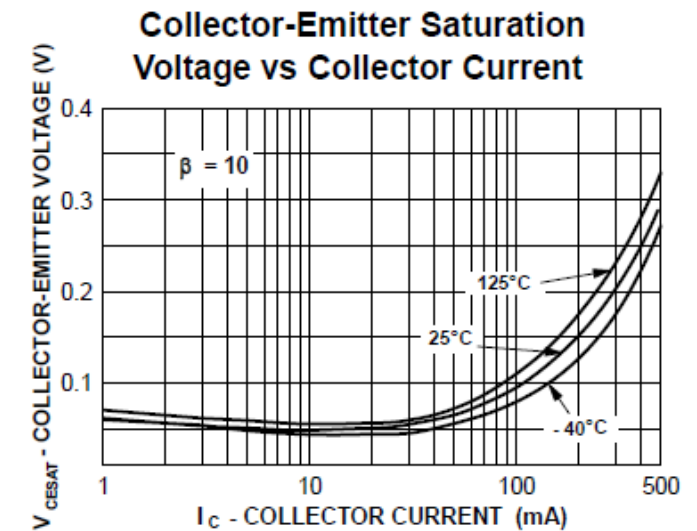
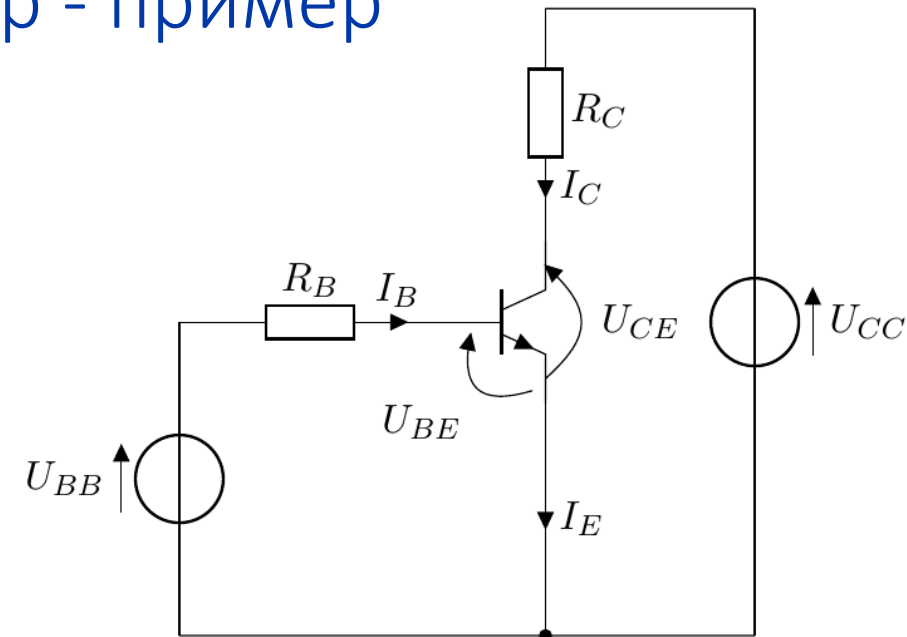


Figure 2. Collector-Emitter Saturation Voltage vs Collector Current

# Бързодействие на ключ с биполярен транзистор

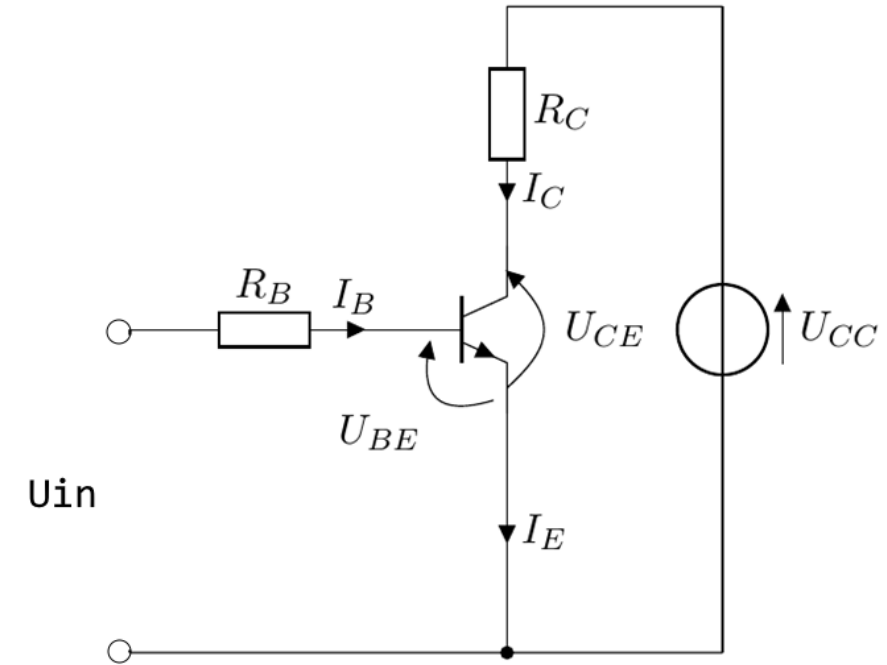
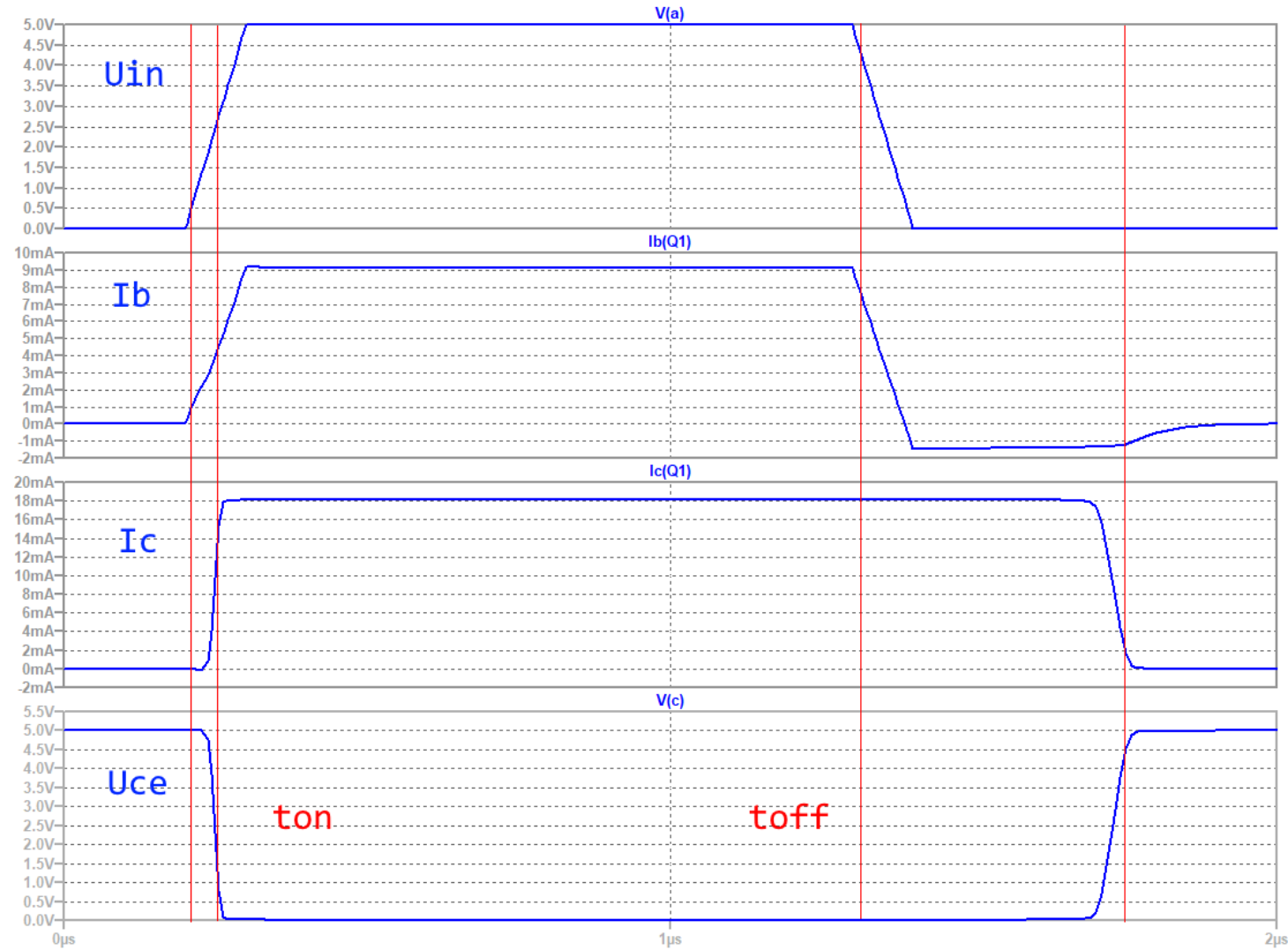
Бързодействието на ключа зависи от продължителността на преходните процеси при превключване. Преходните процеси се дължат на:

- Инерционността на процесите на пренасяне, натрупване и разнасяне на токоносителите в базата и колектора в транзистора
- Времето, необходимо за презареждане на капацитетите на преходите
- Наличието на паразитни капацитети на корпуса и индуктивности на изводите

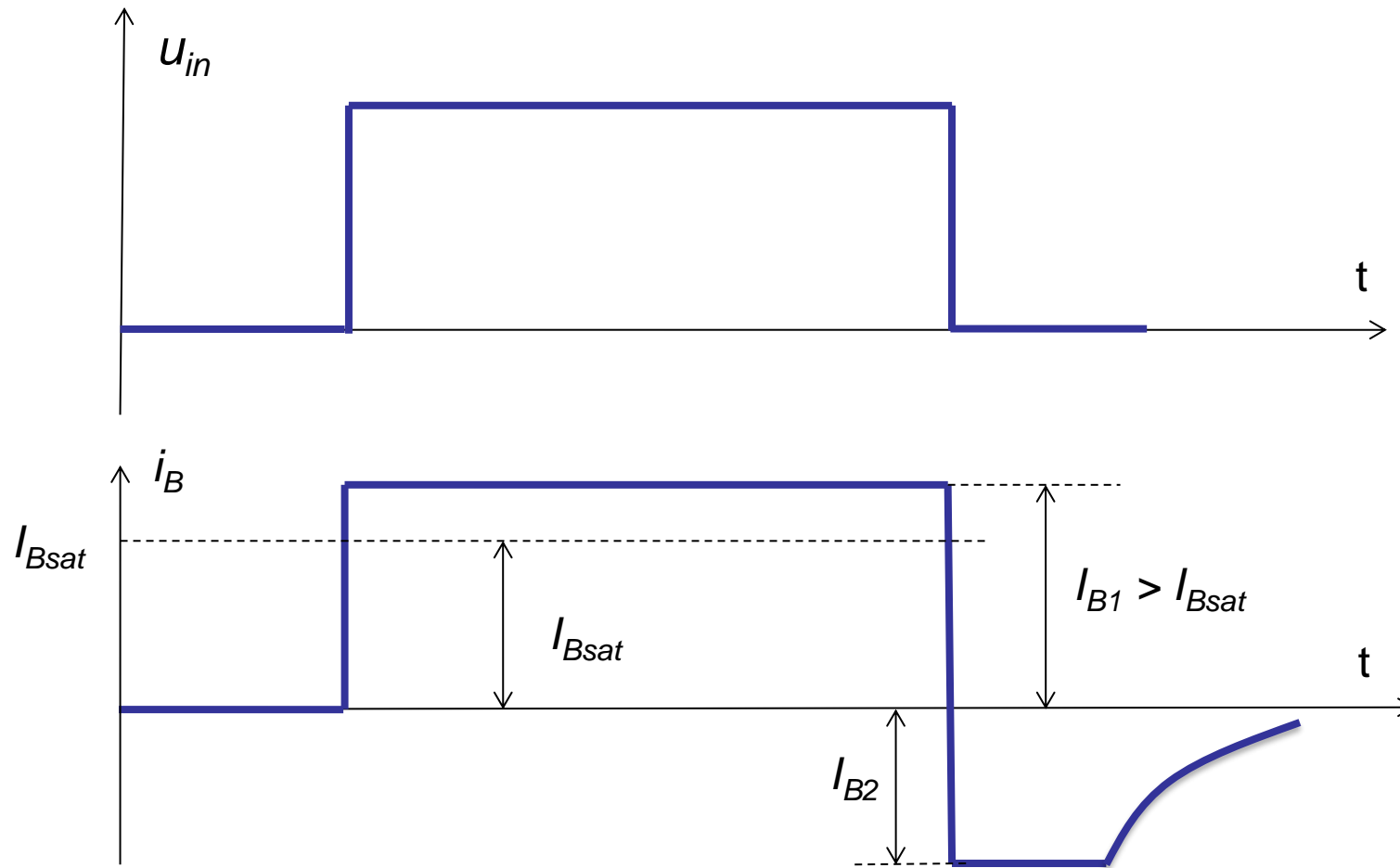
В изходно състояние транзисторът е запушен. На входа му се подава отпушващ положителен импулс. Пренебрегват се преходните процеси в базата и се предполага, че напрежението е достатъчно транзисторът да влезе в насищане. След време, равно на продължителността на импулса, поляритетът на входното напрежение се променя.



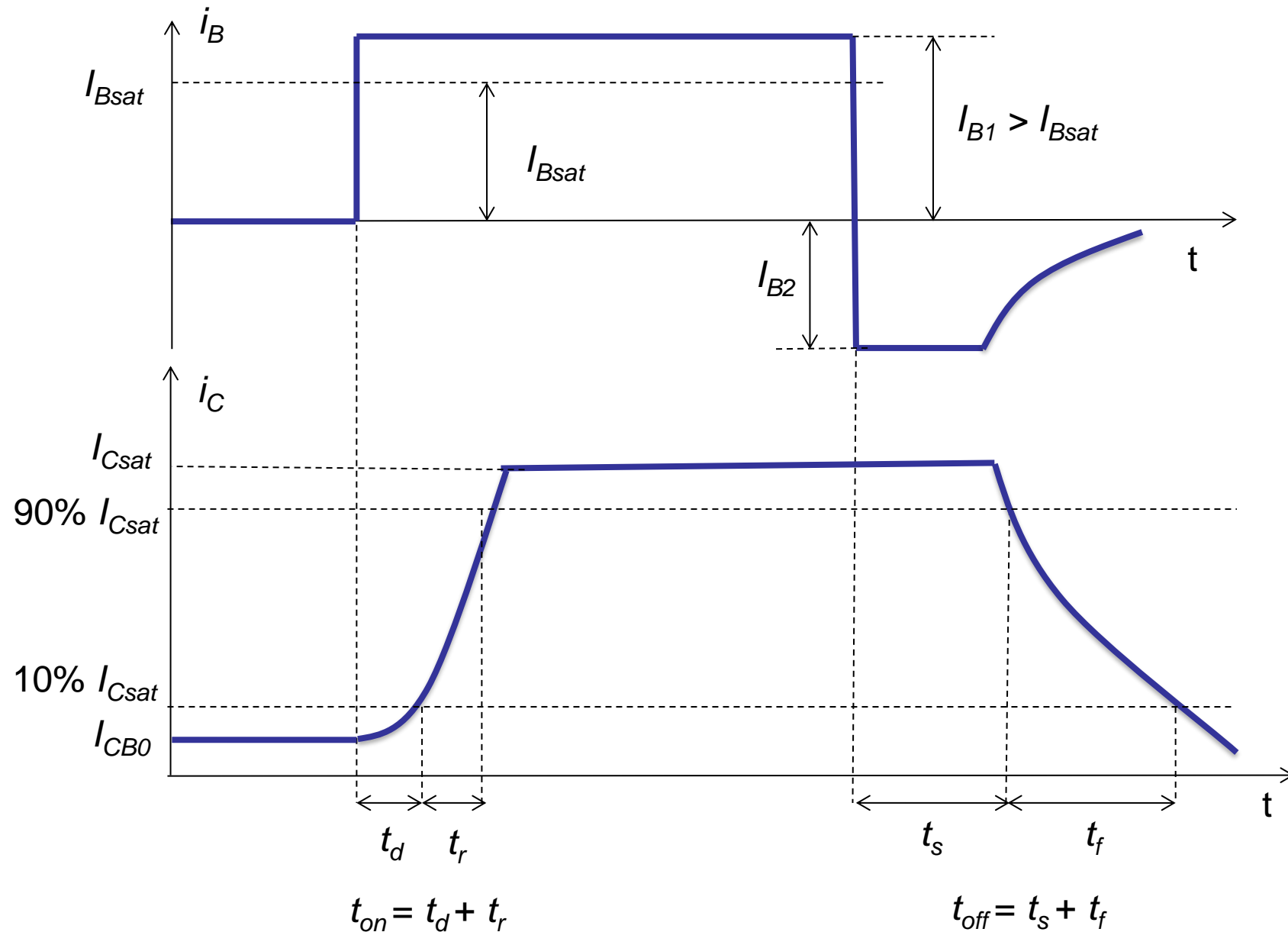
# Преходни процеси при превключване



# Преходни процеси при превключване



# Преходни процеси при превключване



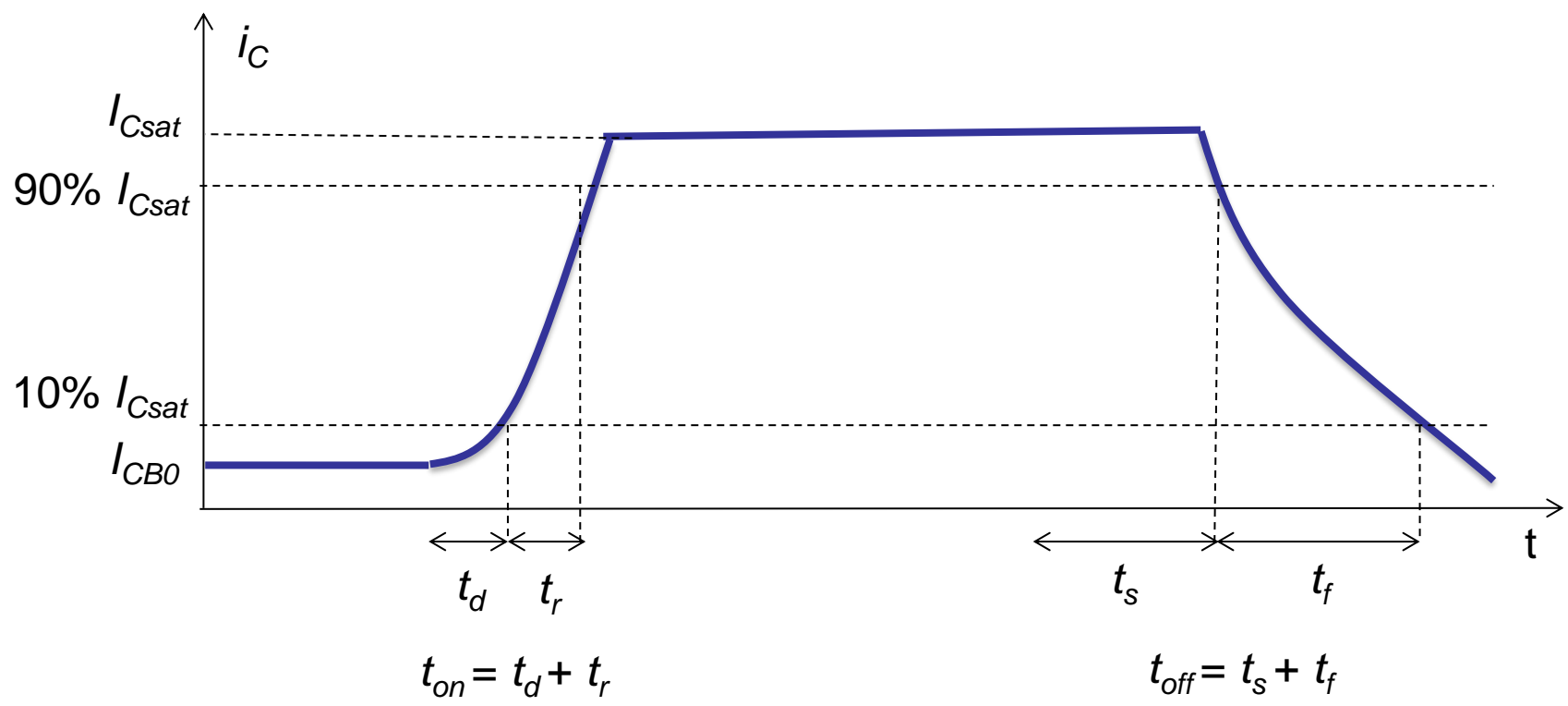
$t_d$  – време на закъснение  
(turn-on delay time) – от подаване на  
отпушващ импулс до достигане на  $i_C$   
 $= 10\%$  от  $I_{Csat}$

$t_r$  – време за нарастване  
(rise time) –  $i_C$  нараства от  $10\%$  до  
 $90\%$   $I_{Csat}$

$t_s$  – време на разнасяне на  
токоносителите от базата  
(storage time) – от подаване на  
запушващ импулс до достигане на  
 $90\%$   $I_{Csat}$

$t_f$  – време за спадане  
(fall time) – времето спадане на  $i_C$  от  
 $90\%$  до  $10\%$   $I_{Csat}$

# Импульсни параметри



## SWITCHING CHARACTERISTICS

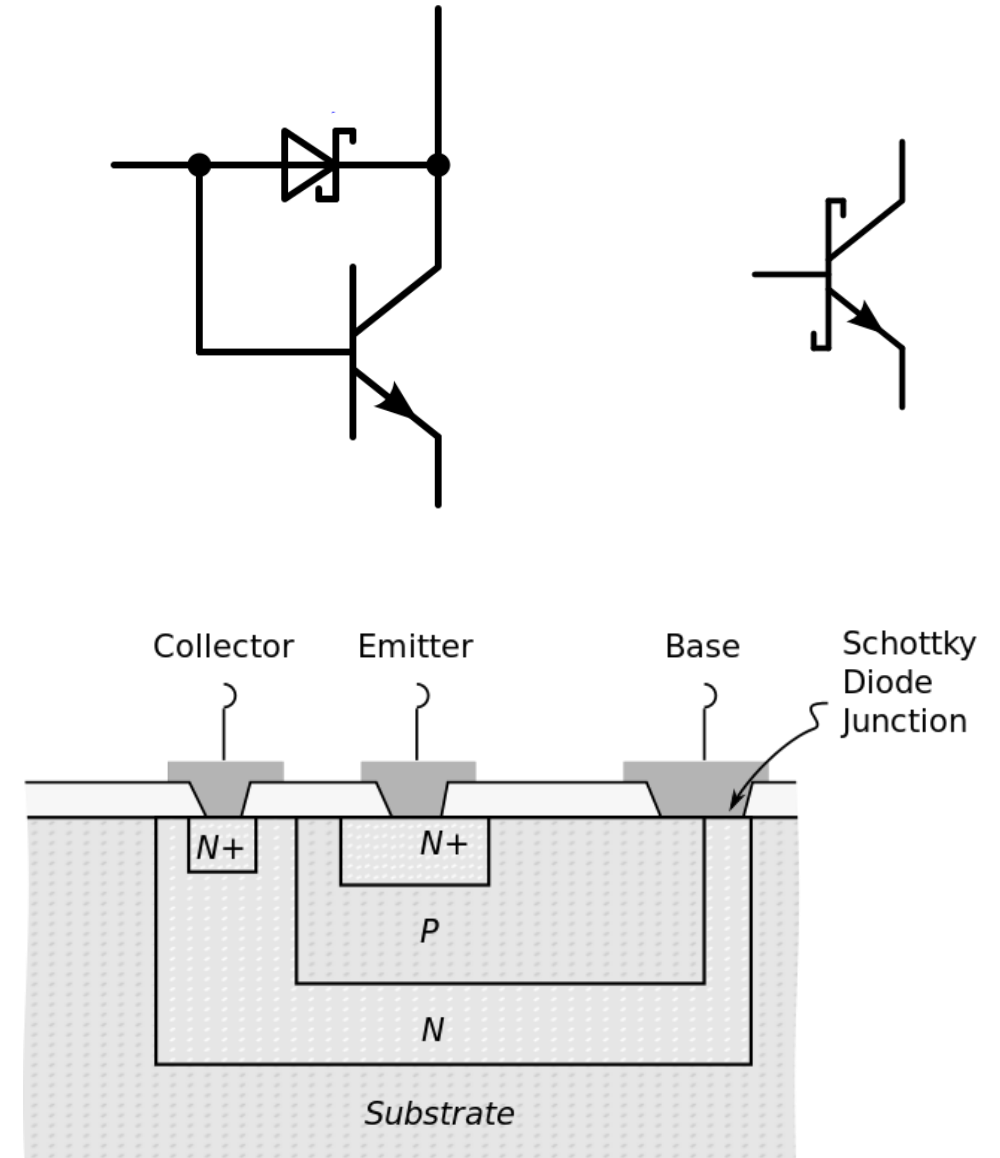
Delay Time	(V <sub>CC</sub> = 30 Vdc, V <sub>BE(off)</sub> = -2.0 Vdc, I <sub>C</sub> = 150 mAdc, I <sub>B1</sub> = 15 mAdc) (Figure 1)	t <sub>d</sub>	-	10	ns
Rise Time		t <sub>r</sub>	-	25	ns
Storage Time	(V <sub>CC</sub> = 30 Vdc, I <sub>C</sub> = 150 mAdc, I <sub>B1</sub> = I <sub>B2</sub> = 15 mAdc) (Figure 2)	t <sub>s</sub>	-	225	ns
Fall Time		t <sub>f</sub>	-	60	ns

# Импулсни параметри

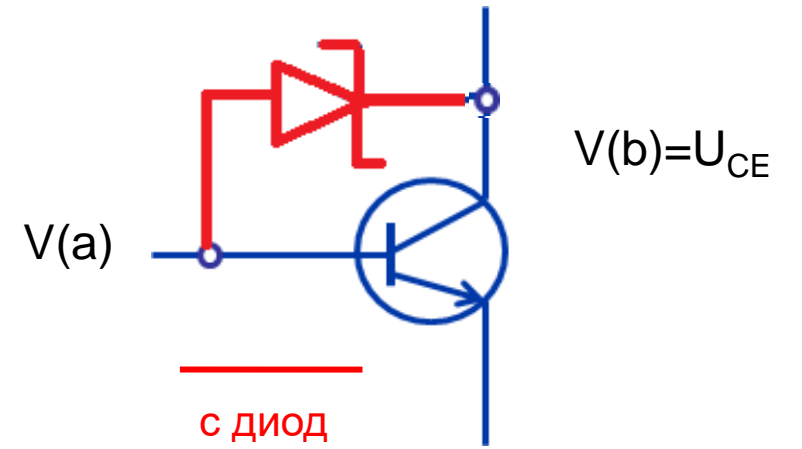
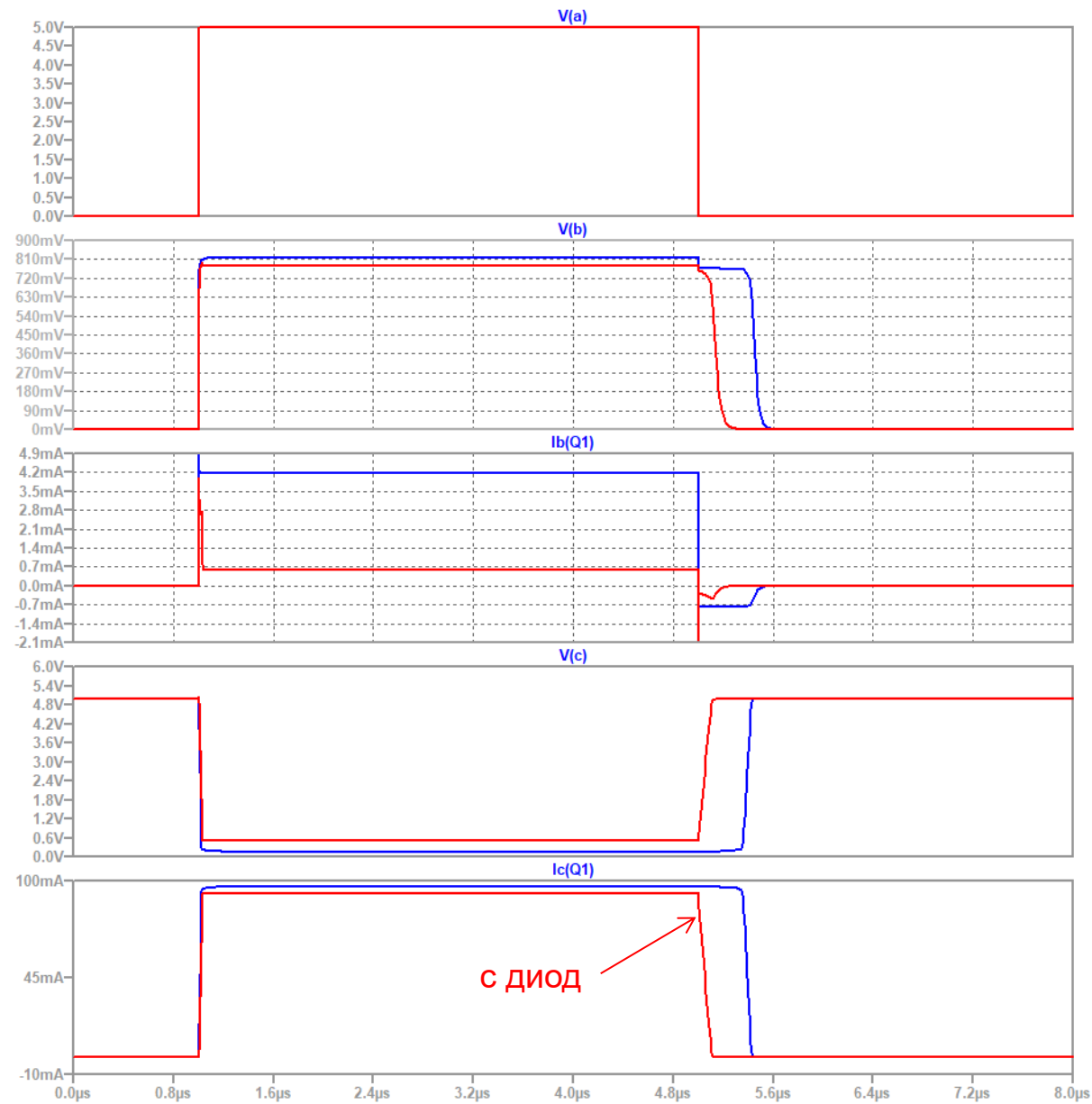
- Времената  $t_s$  и  $t_f$  зависят от  $I_B$  и от честотните свойства на транзистора (геометрични размери и време на живот)
- Времето за разнасяне зависи от пълното количество носители натрупани в базата – т.е от степента на насищане  $N$ .

В интегралните схеми преходът база-колектор се шунтира с диод на Шотки, където  $U_F = 0,1 - 0,3$  V. Това ограничава тока през колекторния преход при право включване и натрупването на токоносители, откъдето  $t_s$  рязко намалява.

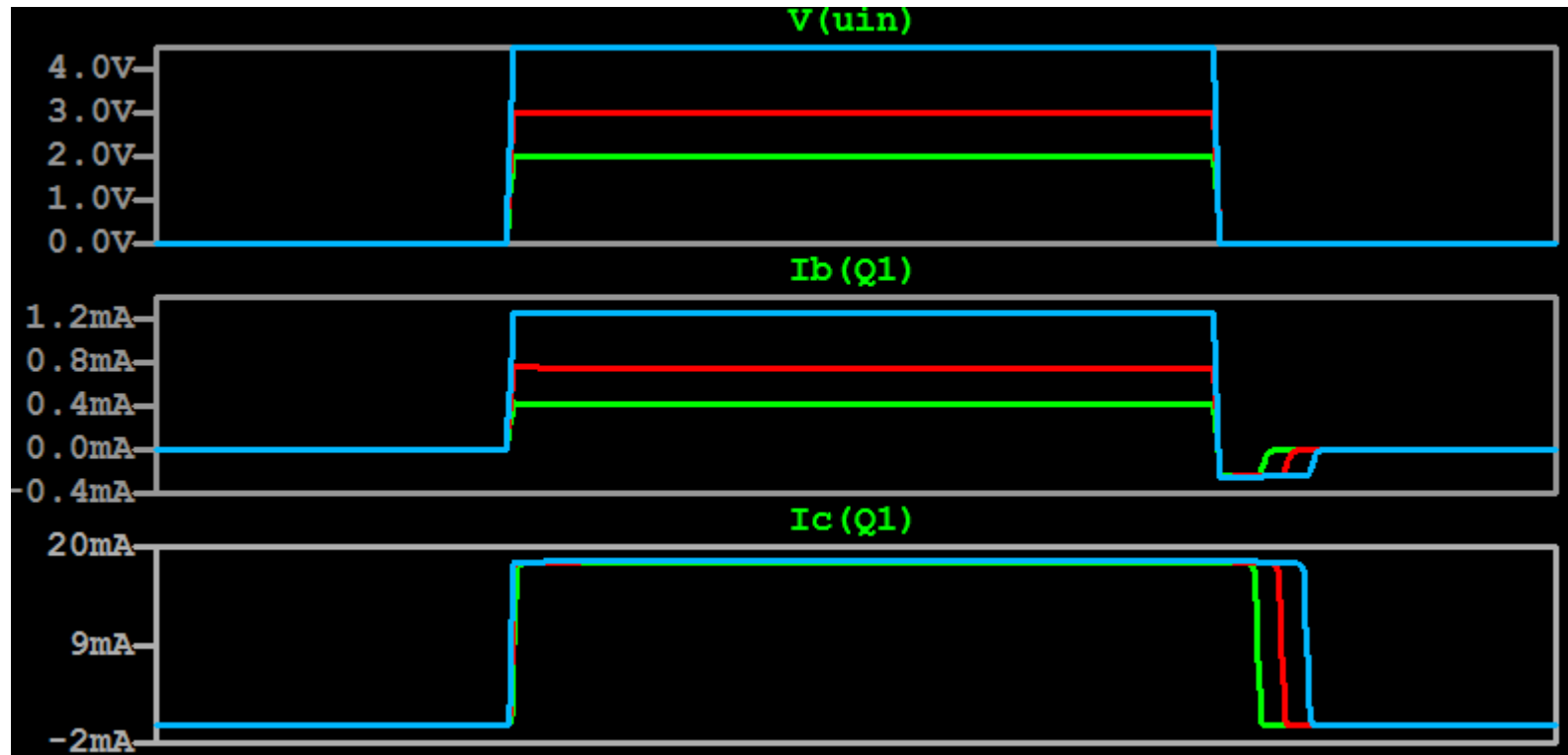
При Шотки диода липсва инжекция на неосновни токоносители и той не допринася за натрупването им при право включване.



# Влияние на Шотки диод

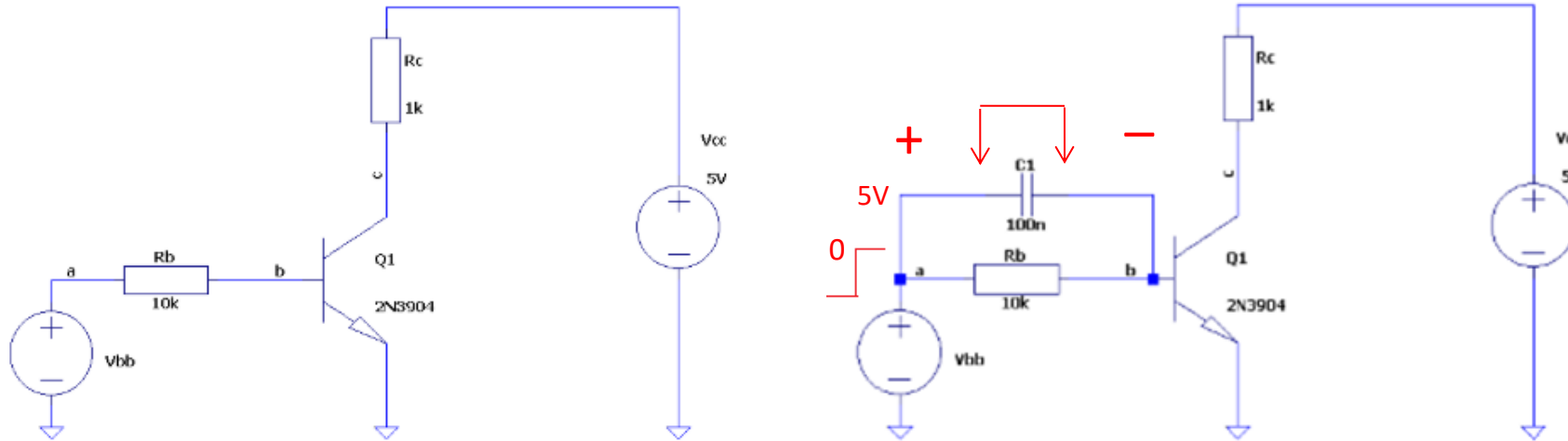


# Влияние на входного напряжение



$$U_{in} \uparrow \Rightarrow I_B = \frac{U_{in} - U_{BE}}{R_B} \uparrow \Rightarrow N = \frac{I_B}{I_{Bsat}} \uparrow \Rightarrow t_{OFF} \uparrow$$

# Влияние на кондензатор в базовата верига



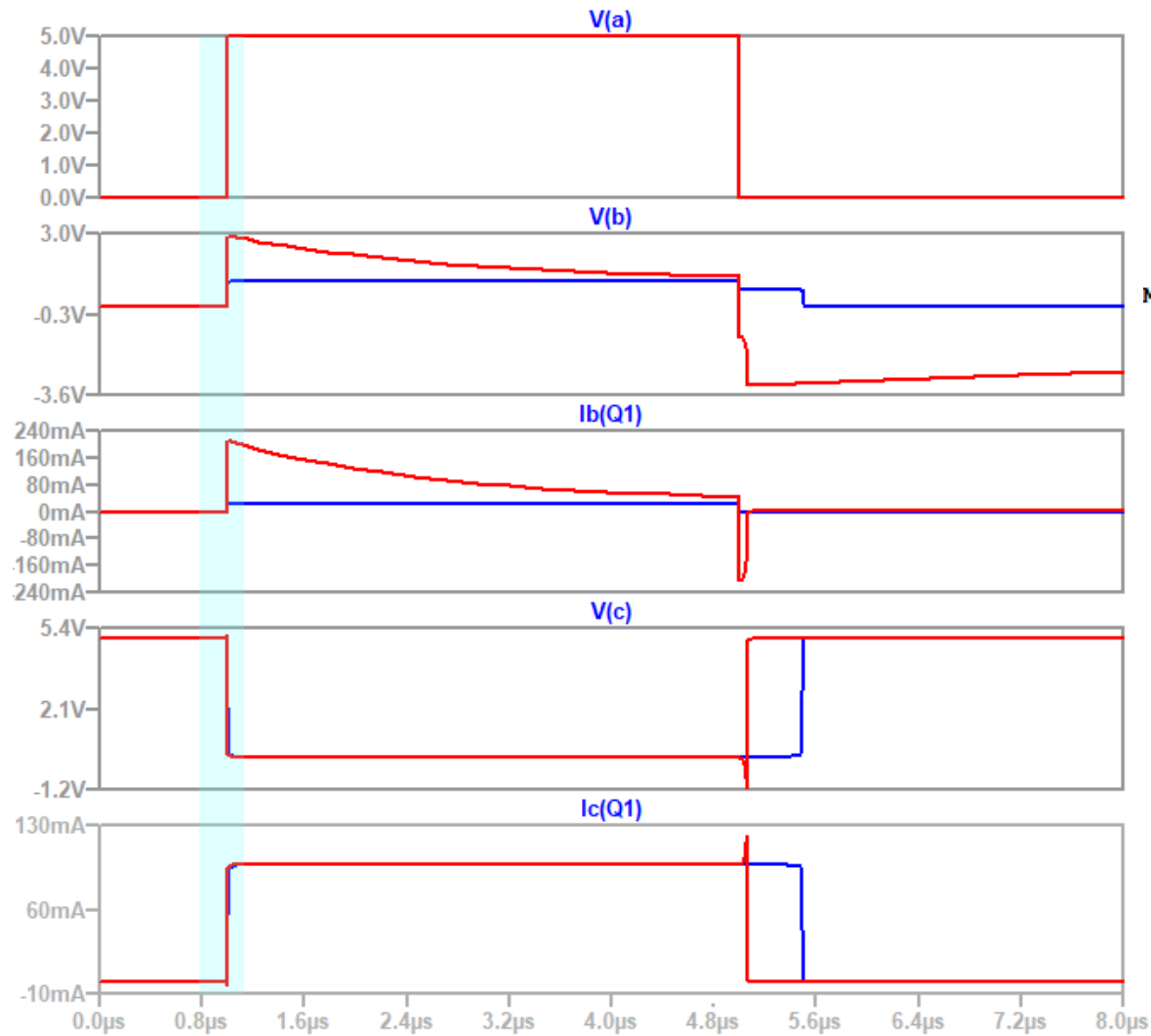
Включването на **ускоряващ кондензатор** в базовата верига на транзистора спомага за подобряване на бързодействието на електронния ключ.

При подаване на положителен отпушващ импулс кондензаторът първоначално не е зареден, шунтира  $R_b$ , осигурявайки голям първоначален ток при включване на транзистора, с което **се намалява  $t_{on}$** .

Постепенно кондензаторът се зарежда до стойността на напрежението върху  $R_b$   $U_{Rb} = V_{bb} - U_{be}$ . Базовият ток постепенно намалява, докато достигне стойността си без наличие на кондензатор и транзисторът се установява в насищане.



# Влияние на кондензатор в базовата верига



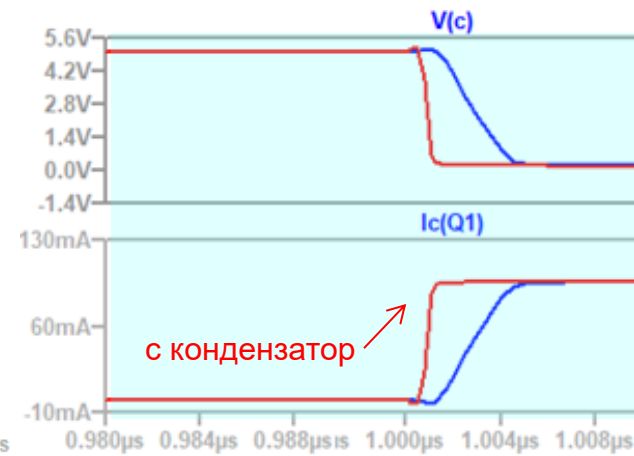
.step cb=0

.step cb=1e-07 с кондензатор

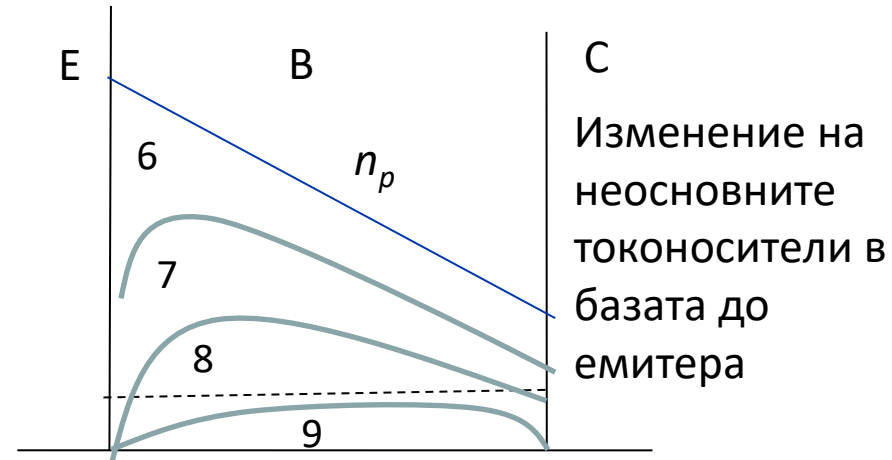
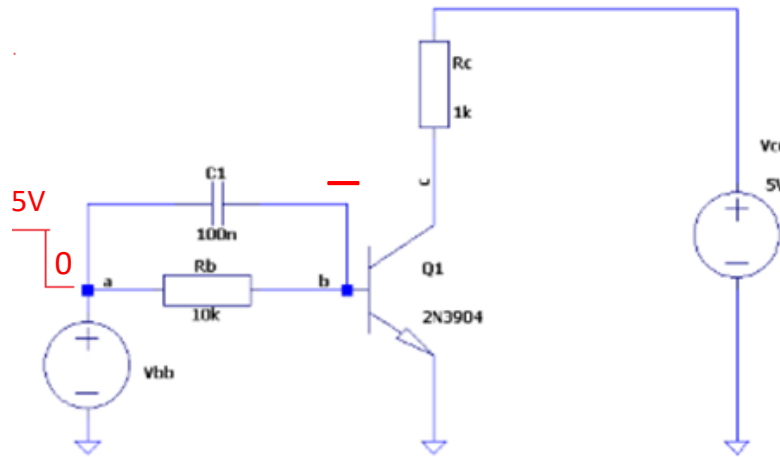
Measurement: ton

step	ton	FROM	TO
1	2.37759e-09	1.0005e-06	1.00288e-06
2	3.97738e-10	1.0005e-06	1.0009e-06

Време за включване  $t_{on}$



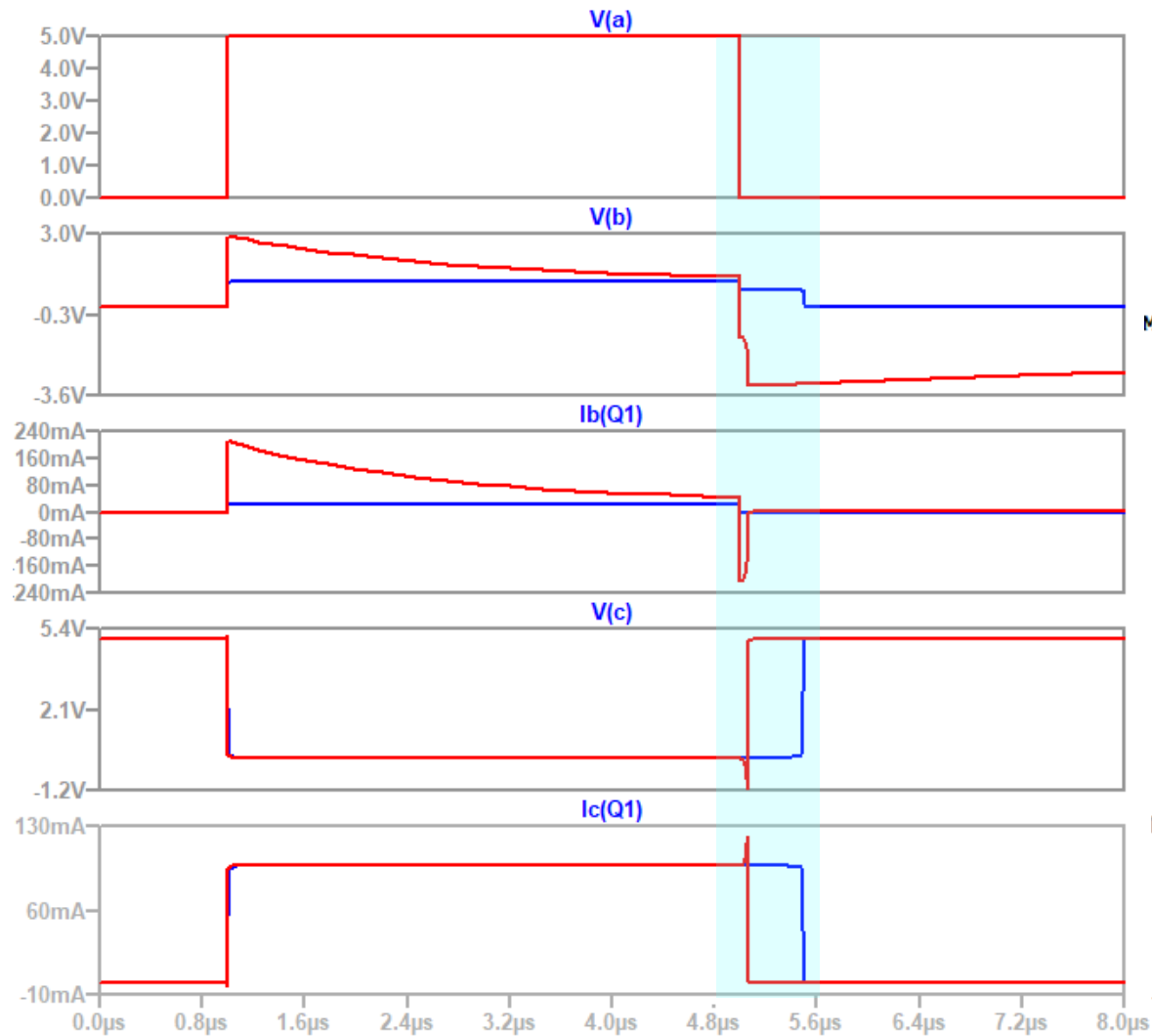
# Влияние на кондензатор в базовата верига



При насищане, в базата се натрупва заряд, който трябва да се разнесе, за да се запуши транзисторът. В първия момент, при подаване на запущащ импулс (от 5V до 0V), кондензаторът е зареден и напрежението върху него се подава като голямо отрицателно (обратно) напрежение към прехода база-емитер.

Това рязко увеличава обратния базов ток по време на превключването, който буквално "изсмуква" натрупания заряд в базовата област, ускорявайки разнасянето на токоносителите. Така се **намалява**  $t_{off}$  и транзисторът се запуща по-бързо.

# Влияние на кондензатор в базовата верига



.step cb=0

.step cb=1e-07 с кондензатор

Measurement: toff

step	toff	FROM	TO
1	4.91097e-07	5.0015e-06	5.4926e-06
2	6.54226e-08	5.0015e-06	5.05692e-06

Време за изключване  $t_{off}$

