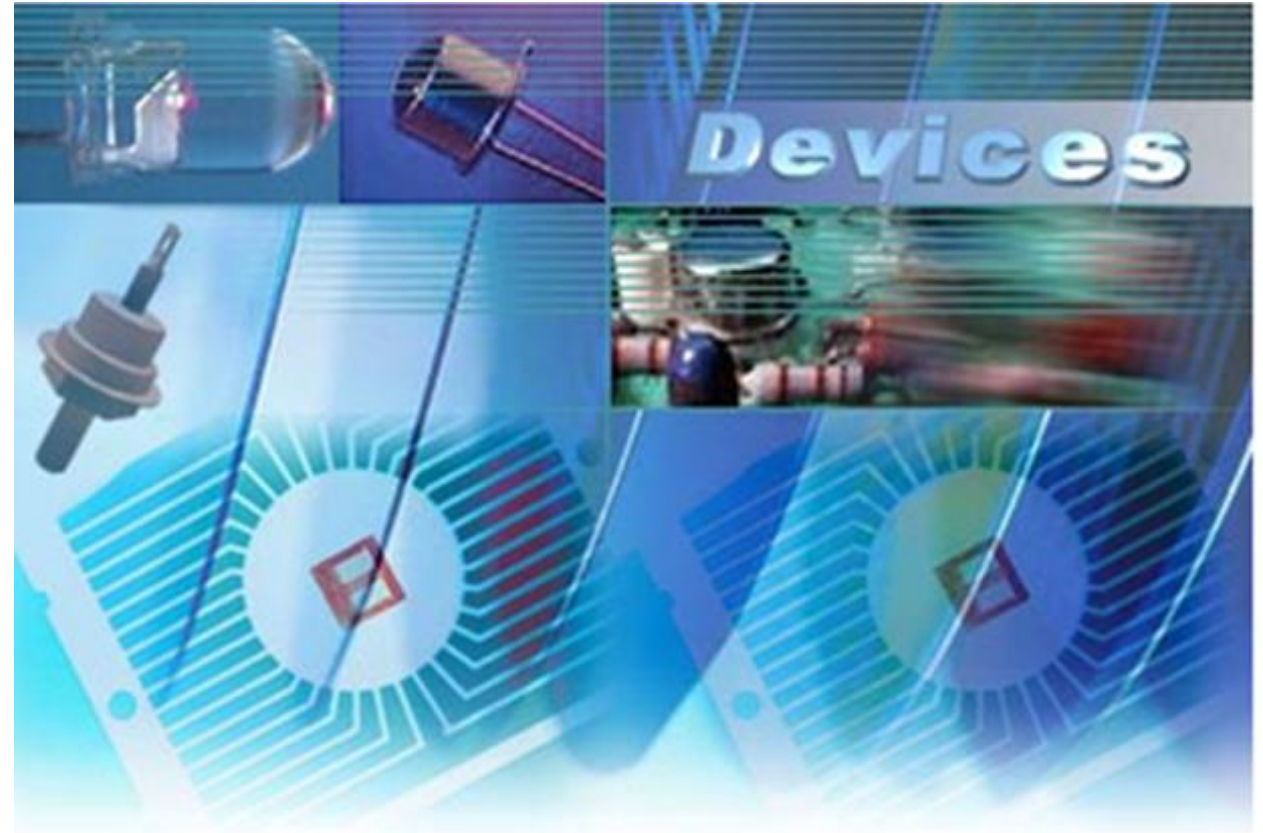


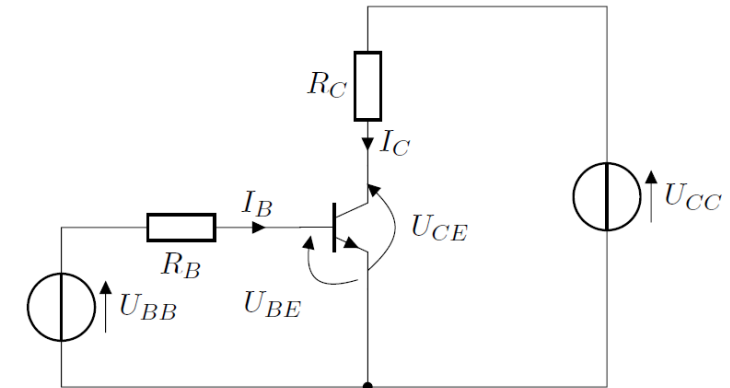
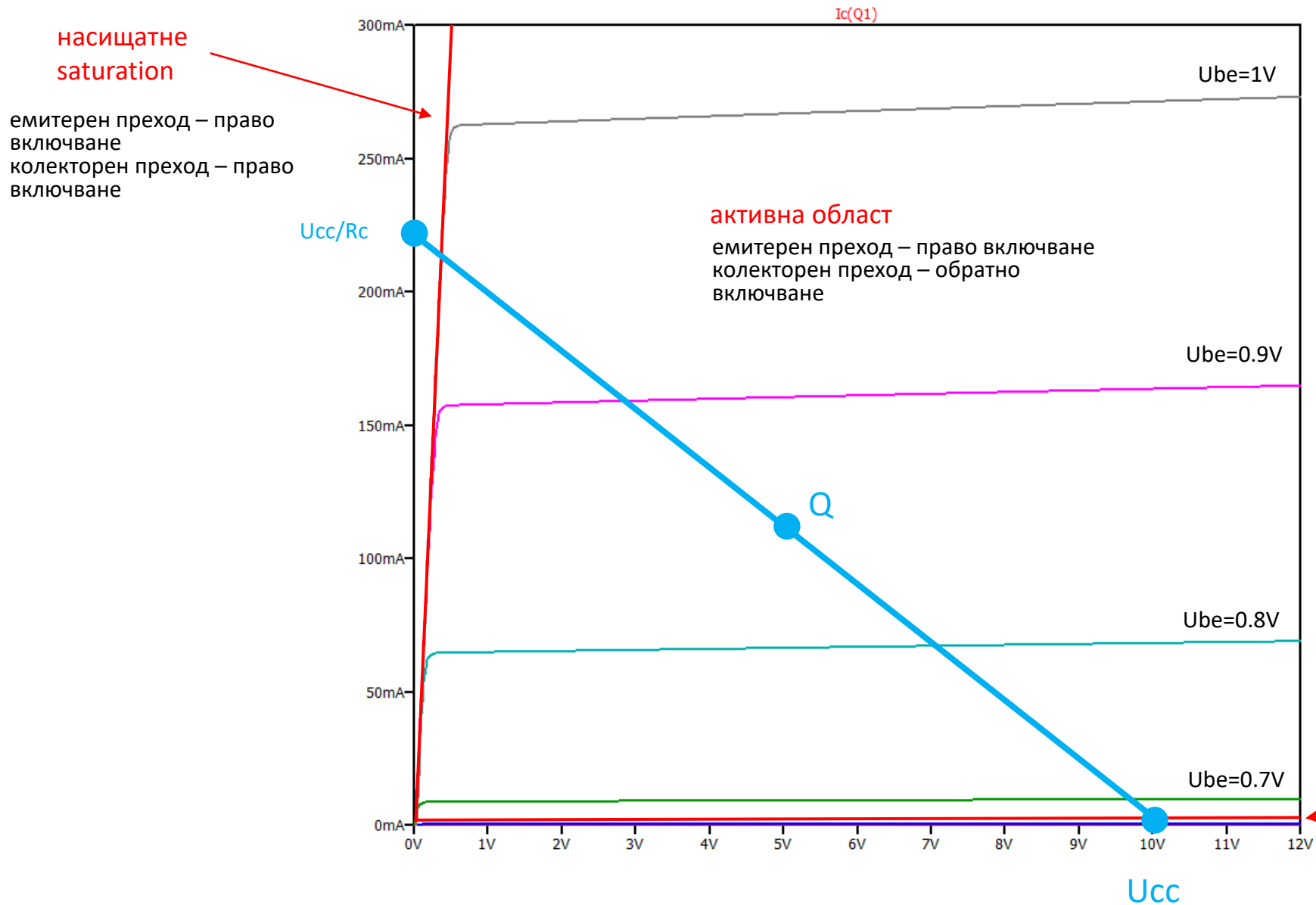


Работа на биполярен транзистор като ключ

Полупроводникови
елементи



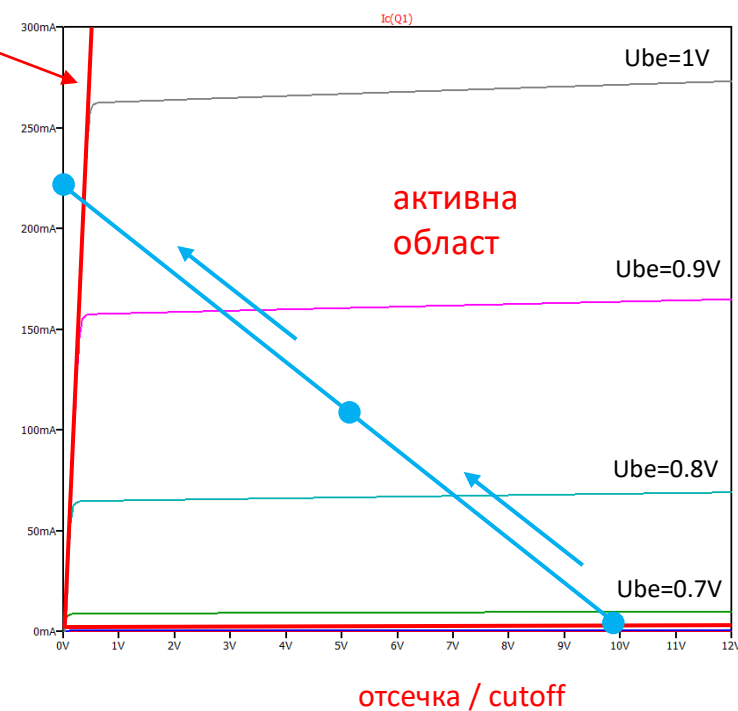
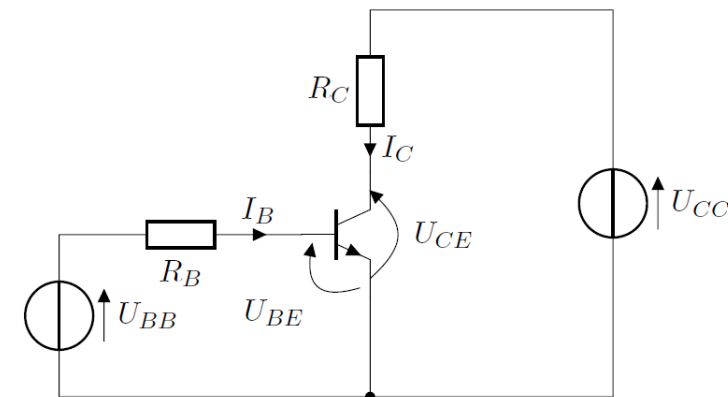
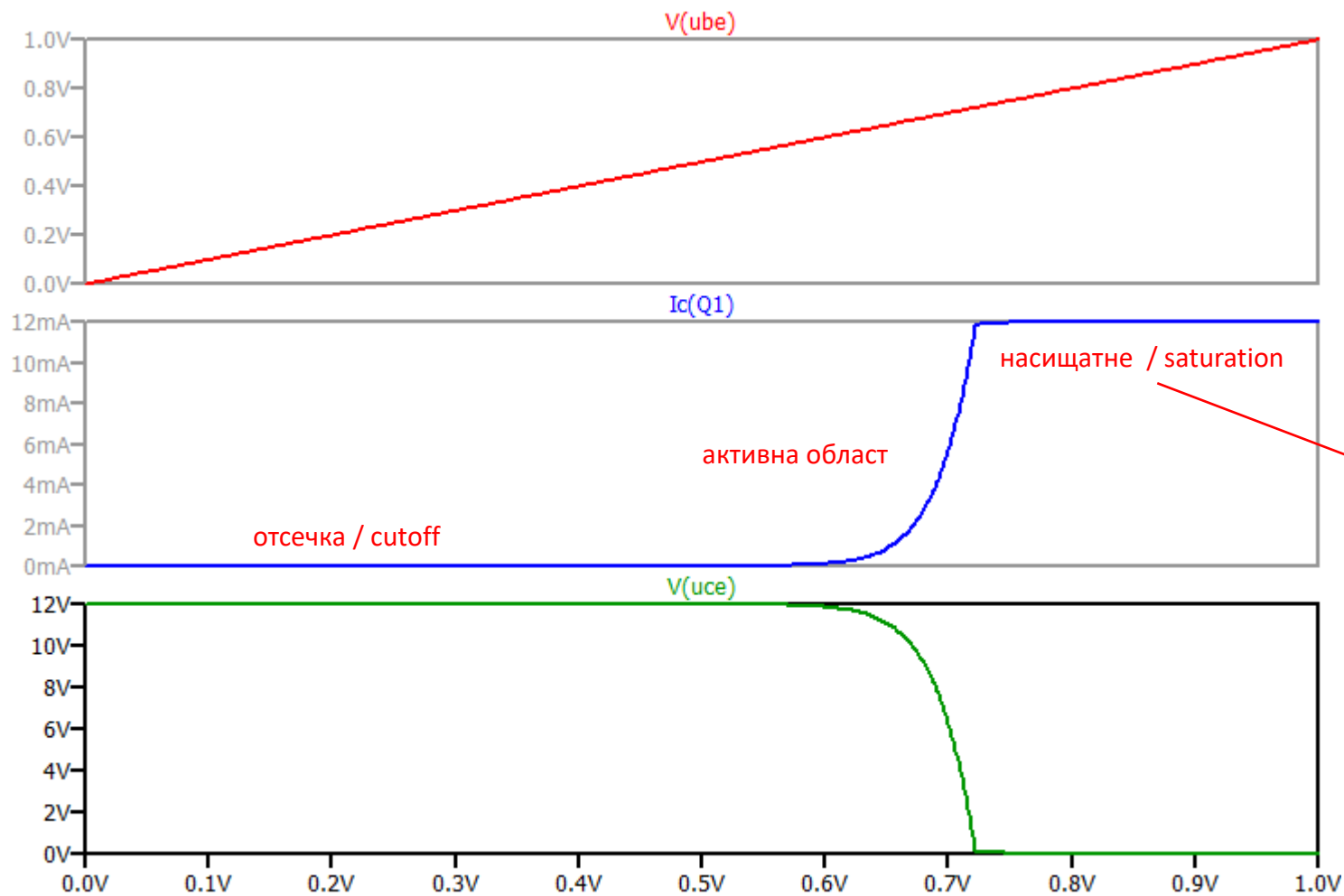
Режими на работа на биполярен транзистор



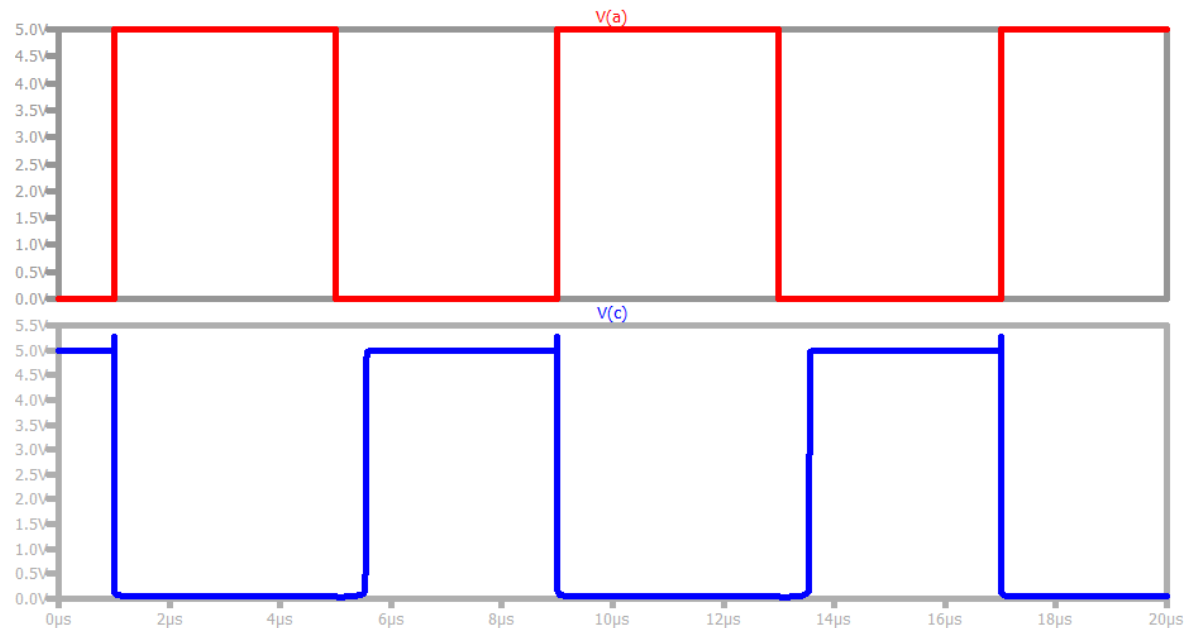
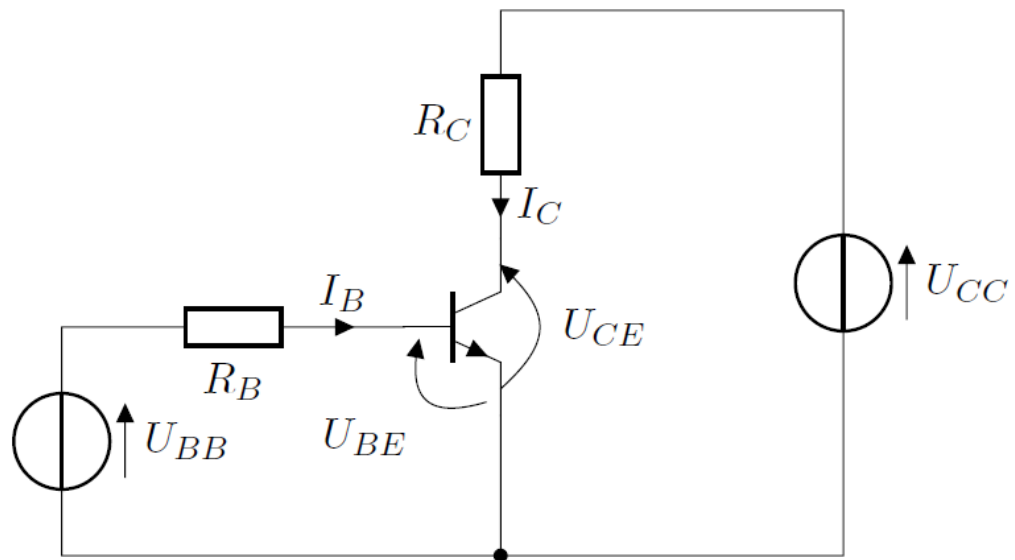
отсечка / cutoff

емитерен преход – обратно включване
колекторен преход – обратно включване

Режими на работа на биполярен транзистор



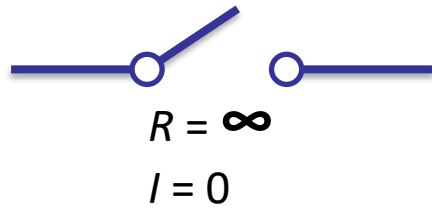
Ключ общ емитер



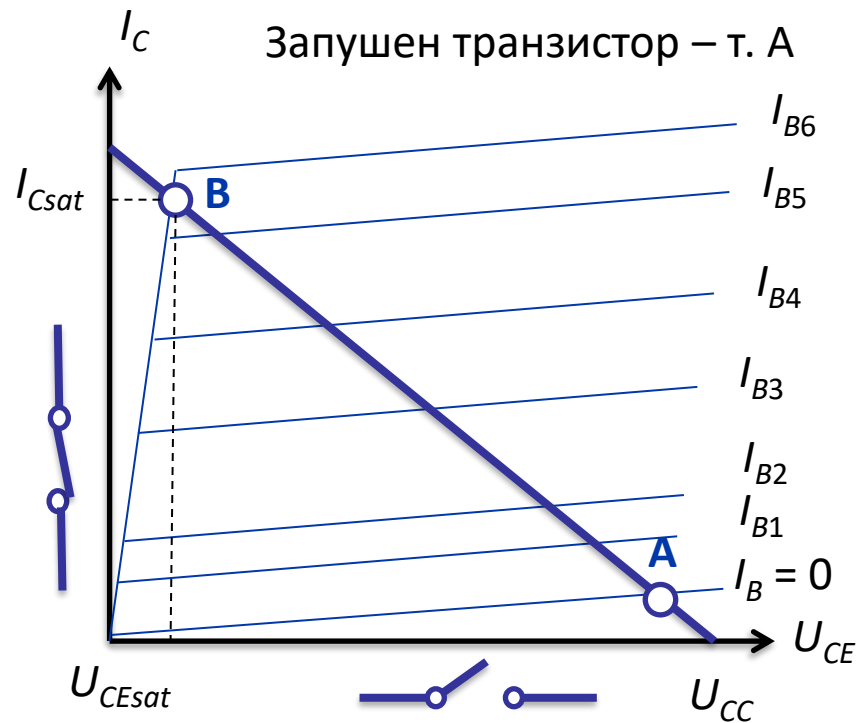
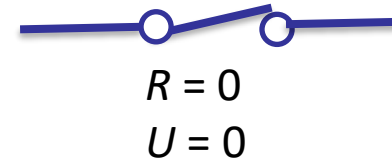
Състоянието на ключа се определя от амплитудата на входния импулс.

Крайни състояния на ключа

Отворен



Затворен

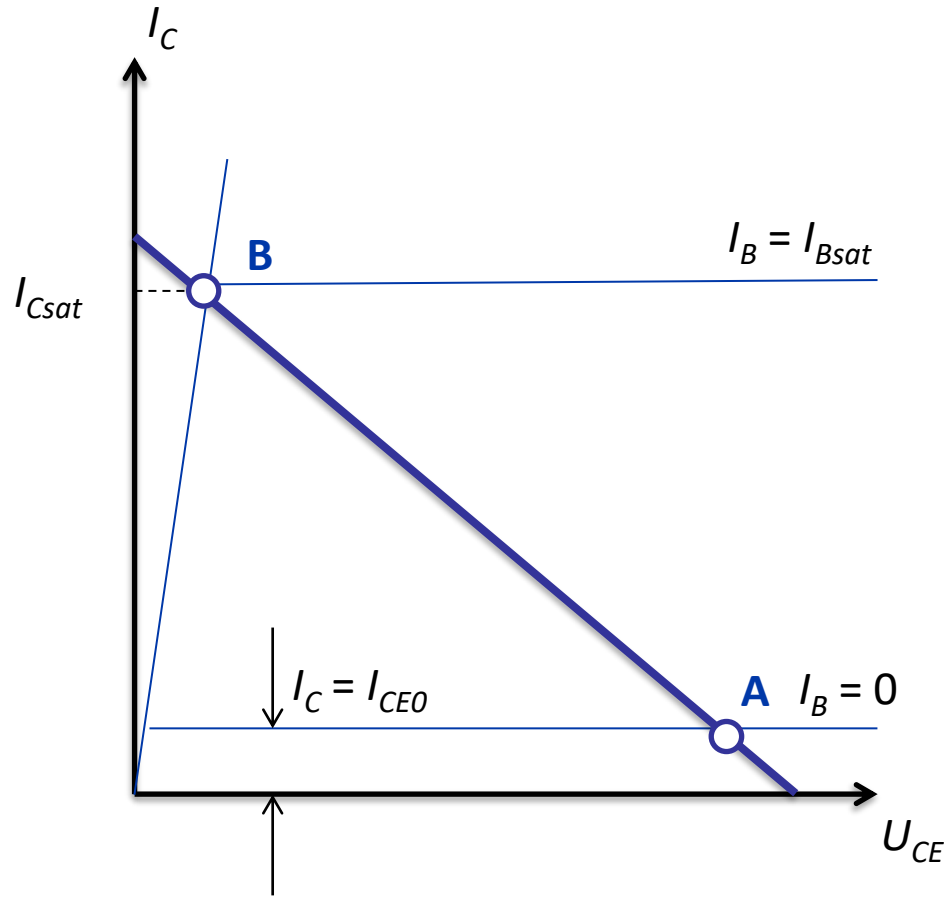


Наситен транзистор – т. В

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

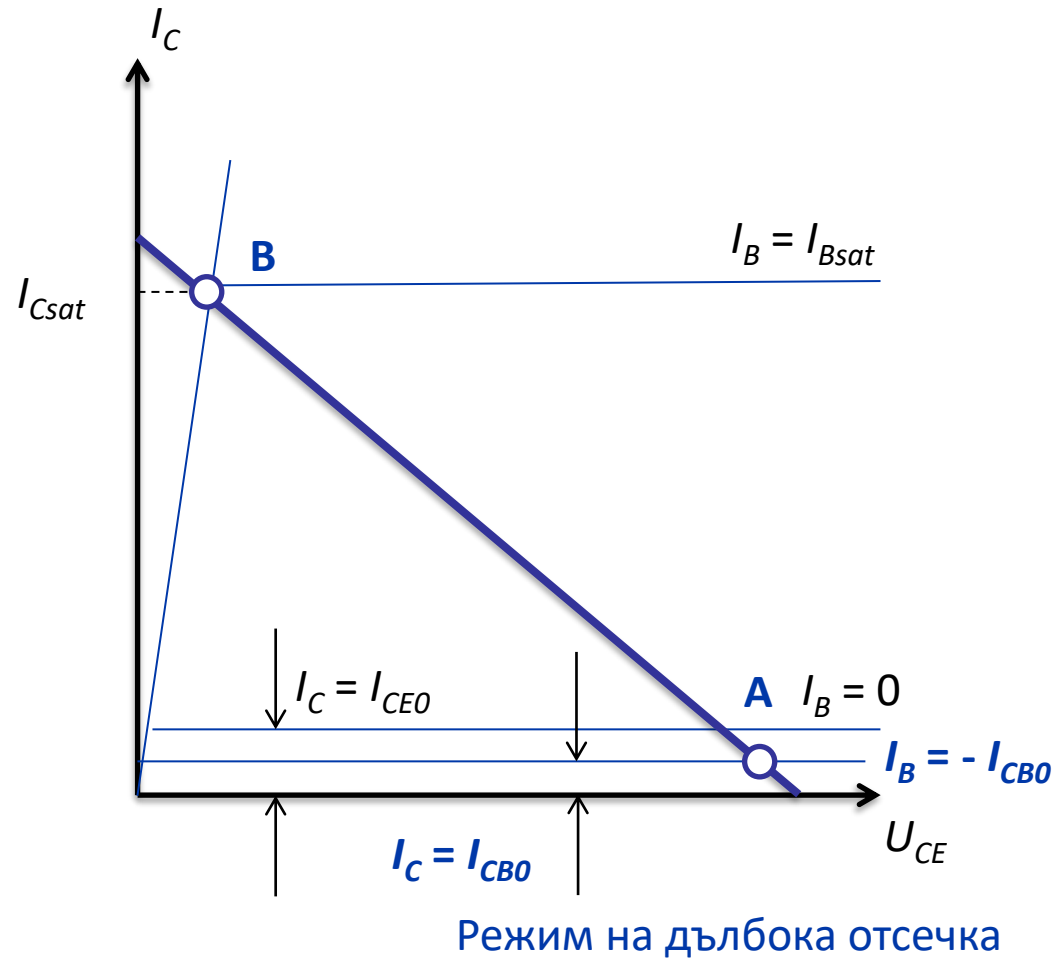


$$I_C = \beta \cdot I_B + (1 + \beta) \cdot I_{CB0}$$

Ако $I_B = 0$

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

Режим на дълбока отсечка

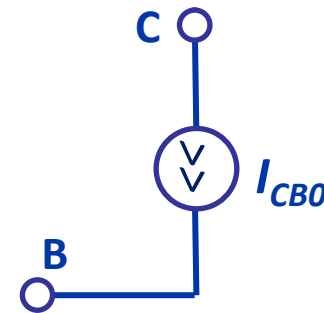


$$I_C = \beta \cdot I_B + (1 + \beta) \cdot I_{CBO}$$

Ако $I_B = -I_{CBO}$

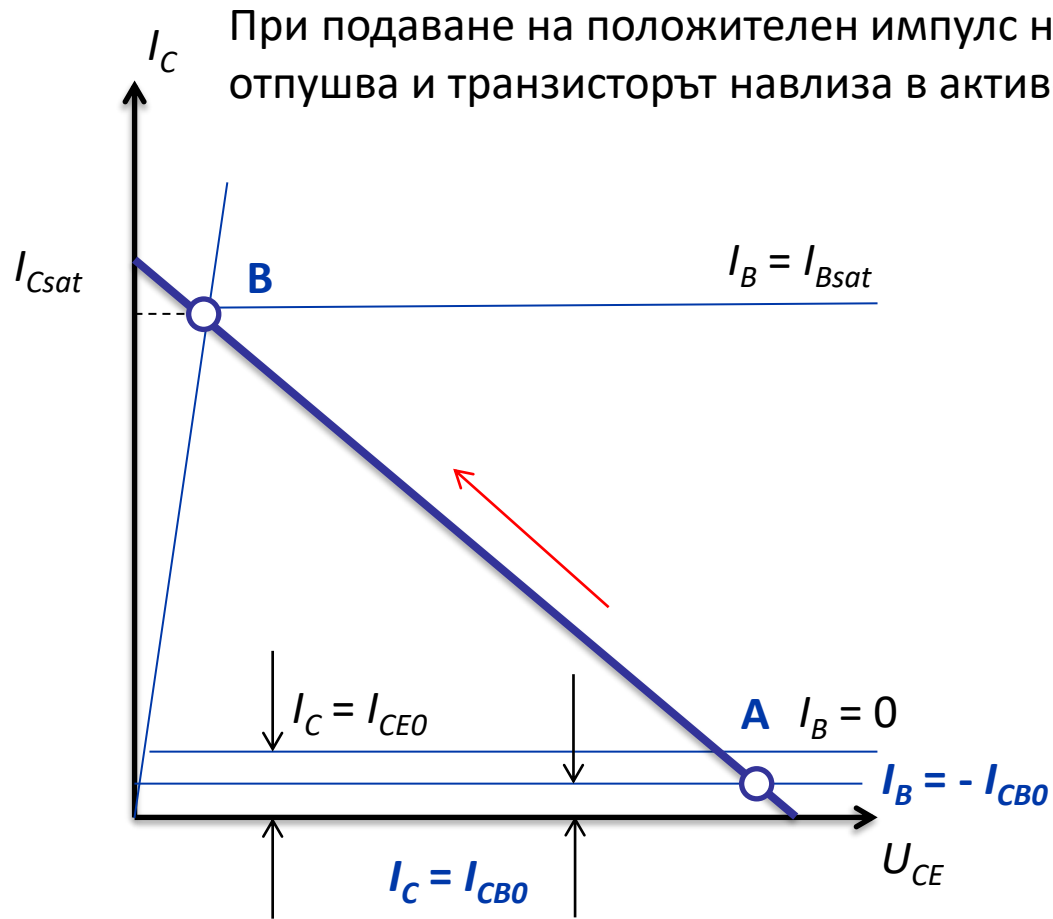
$$I_C = I_{CBO}$$

Режим на
дълбока отсечка
– т. А



Еквивалентна
схема в режим на
отсечка

Активен режим



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

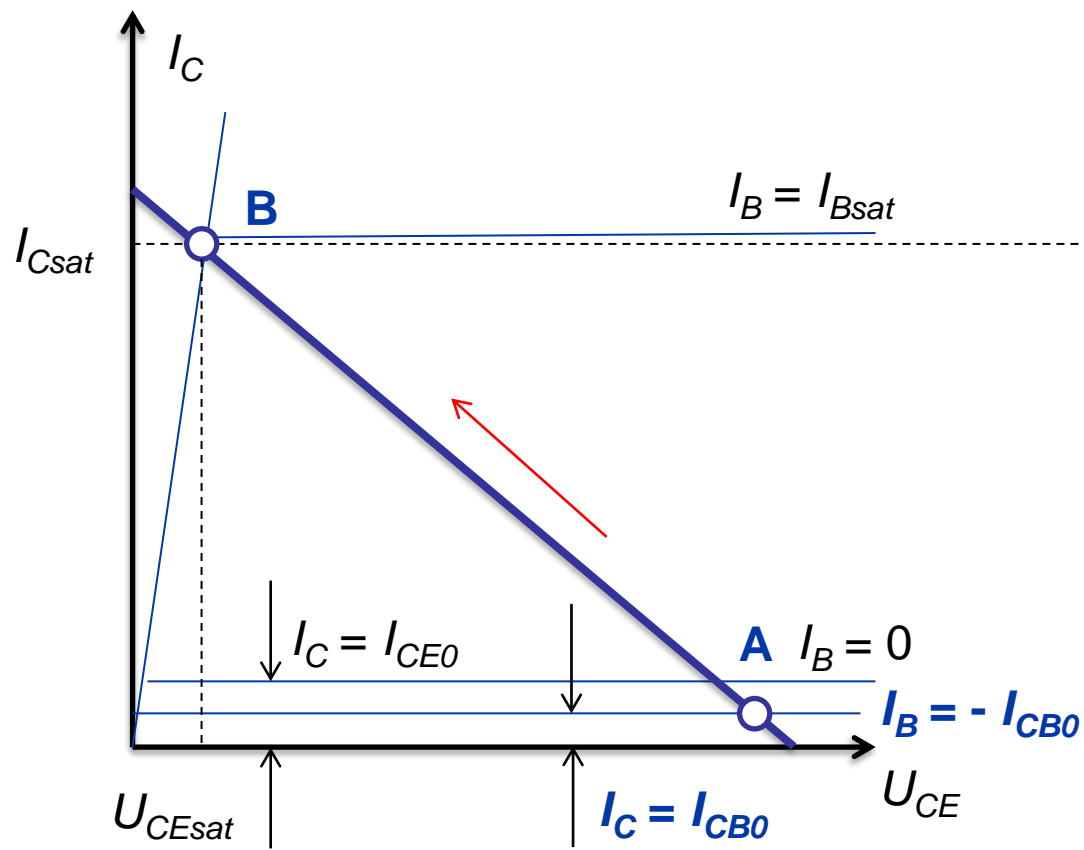
Моментните стойности на токовете в базата и колектора са съответно:

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

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

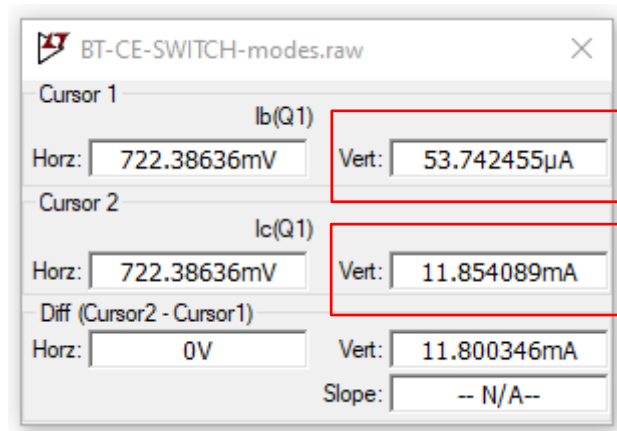
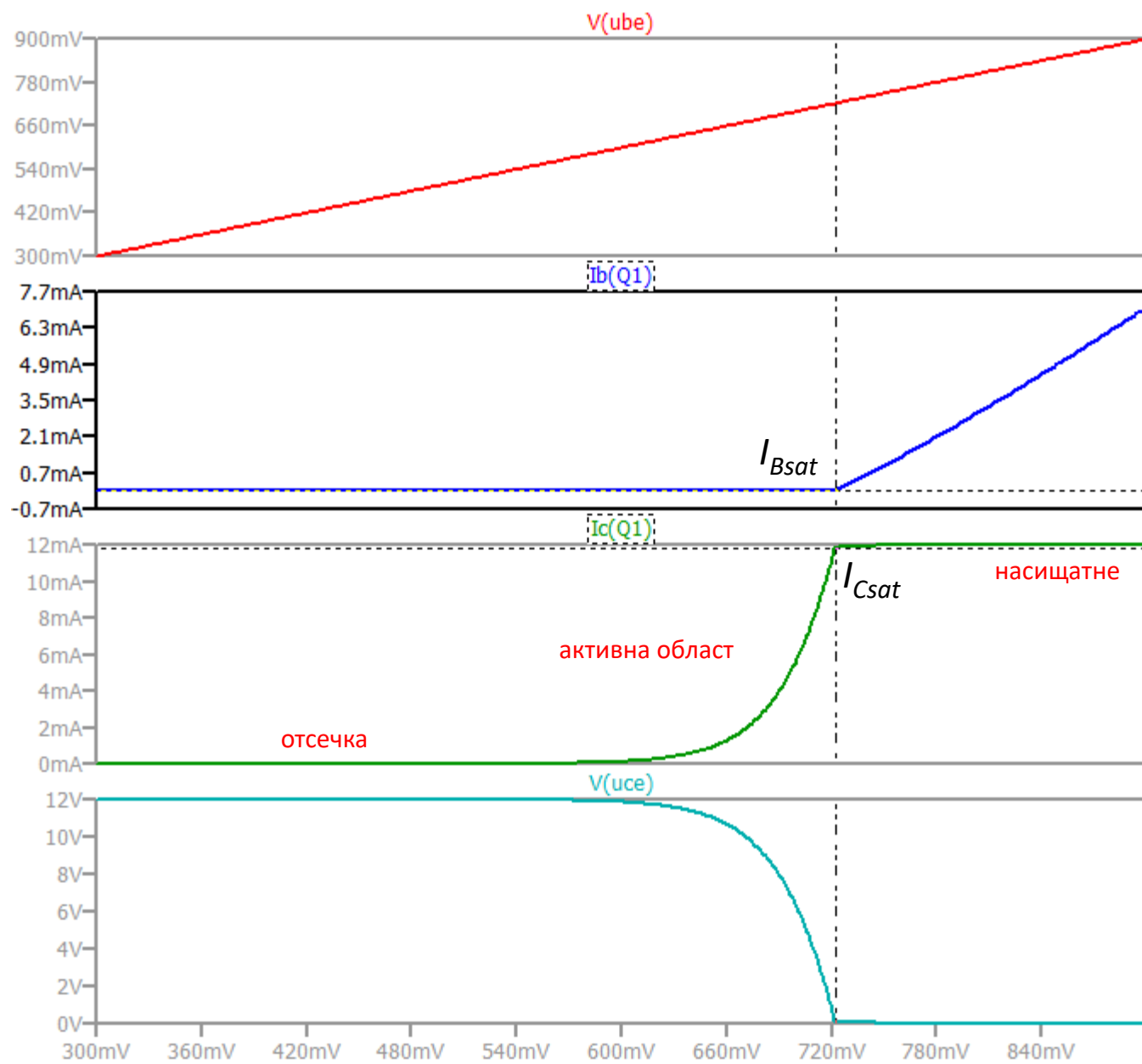
Режим на дълбока отсечка

Графично изменение на токовете



Режим на дълбока отсечка





I_{Bsat}

I_{Csat}

Преминаване към насищане

В активен режим, с нарастването на U_{BE} се увеличава и тока на базата I_B , което води до намаляване на U_{CE}

$$I_B \uparrow \Rightarrow I_C = \beta \cdot I_B \uparrow \Rightarrow I_C \cdot R_C \uparrow \Rightarrow \downarrow U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C$$

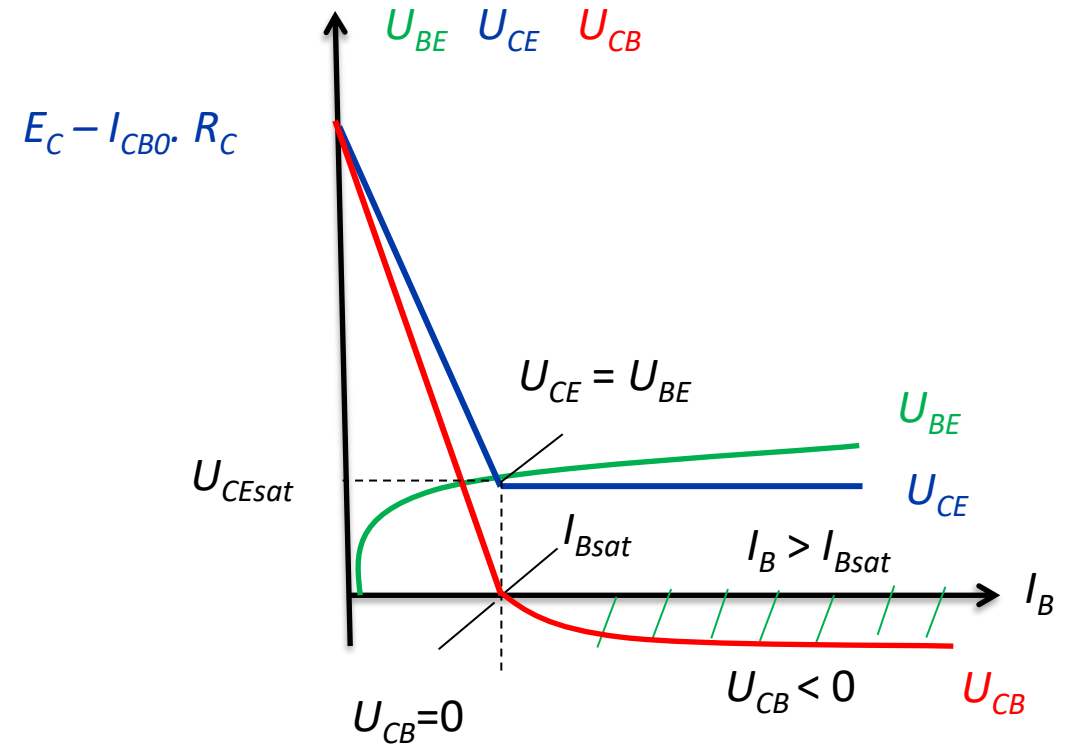
Между напреженията в транзистора има връзка

$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$$

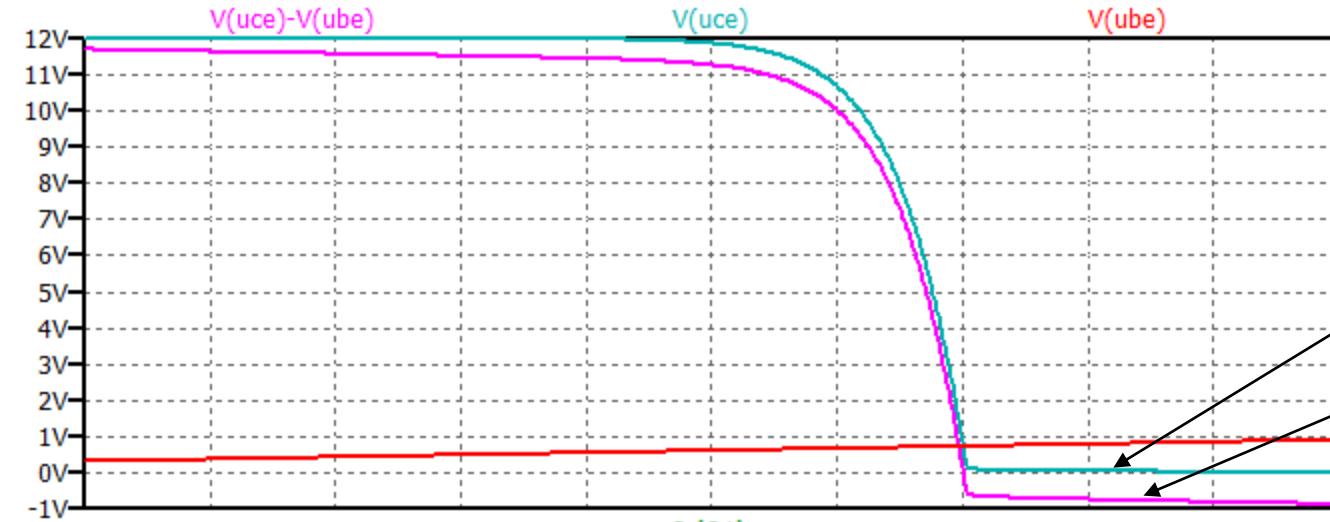
откъдето за напрежението U_{CB} се получава

$$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE}$$

При ток на базата I_{Bsat} напреженията $U_{CE} = U_{BE}$ и $U_{CB} = 0$



За ток $I_B > I_{Bsat}$ напрежението $U_{CB} < 0$ и двата прехода са в право включване – транзисторът **навлиза в режим на насищане**



$$U_{CE} \approx 0$$

$$U_{CB} < 0$$



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).

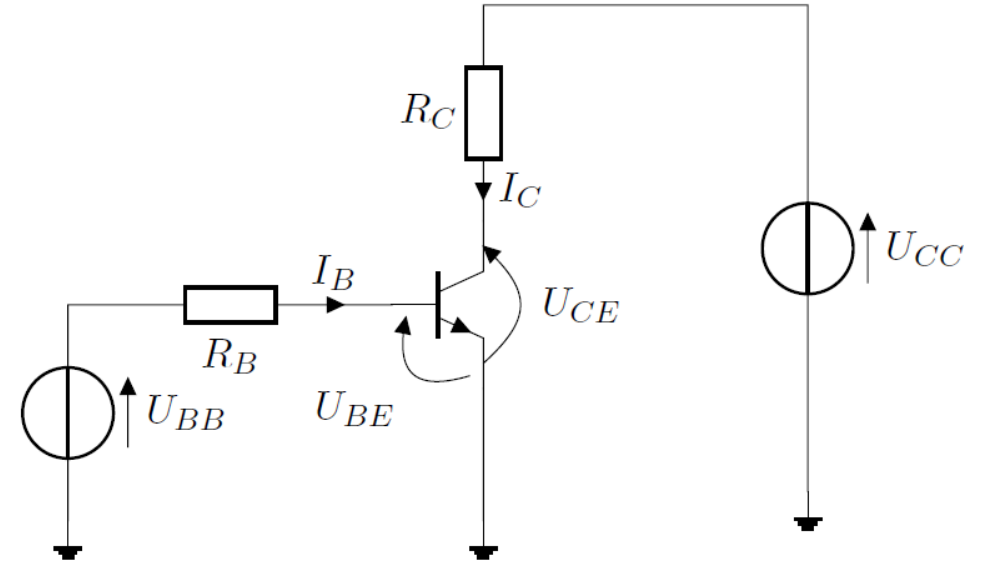
Колекторният ток в режим на насищане е

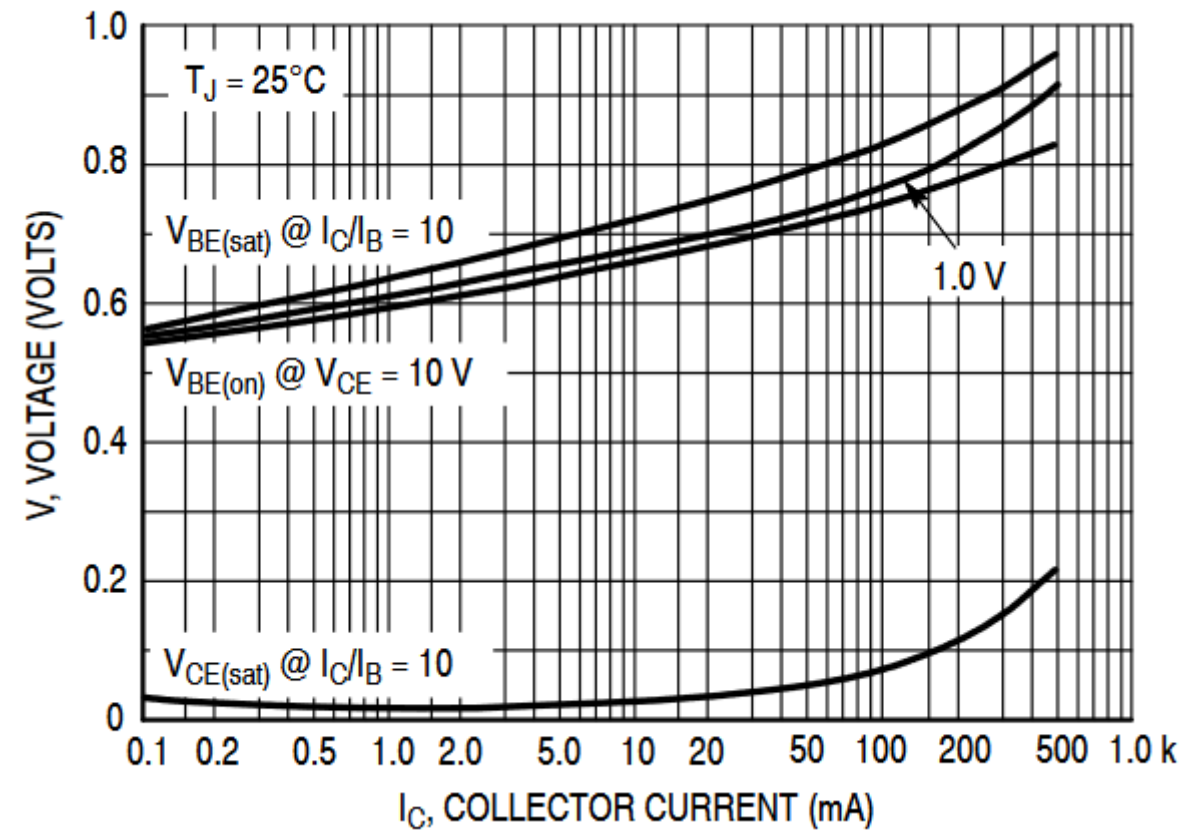
$$I_{Csat} = \frac{U_{CC} - U_{CEsat}}{R_C} \approx \frac{U_{CC}}{R_C}$$

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**.

$$I_B > I_{Bsat}$$

$$\text{Тогава } I_C = I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C}$$

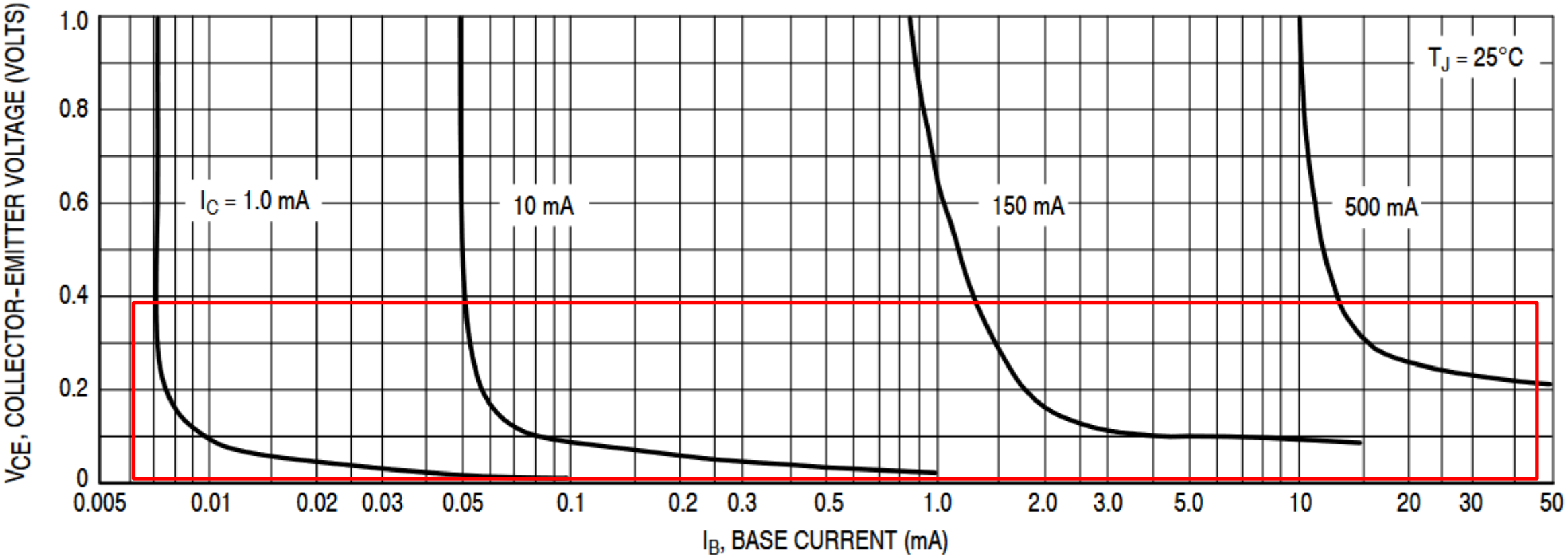
При $I_B > I_{Bsat}$ се сменя поляритета на напрежението U_{CB} и двата прехода се включват в права посока. В режим на насищане **не важи условието** $I_C = \beta \cdot I_B$.

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.

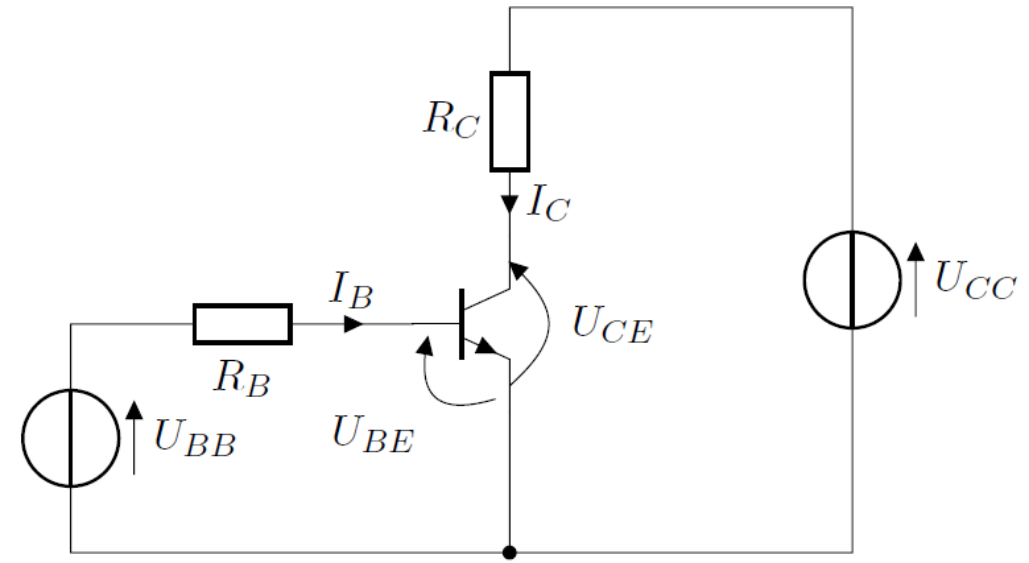
- 3) Проверка на режима

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 $U_{CE} = U_{CC} - I_{Csat} \cdot R_C = 0V$

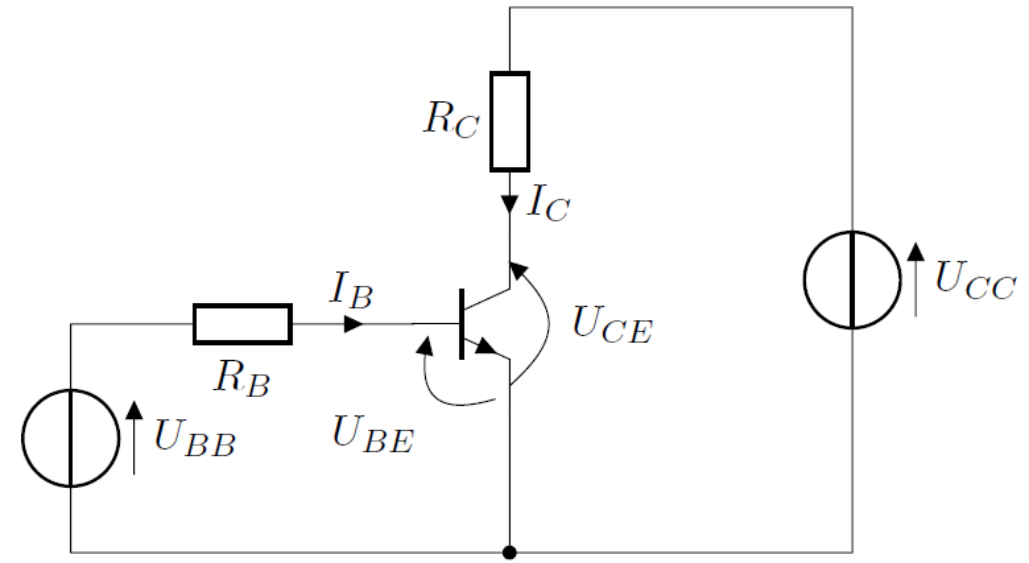


Задачи за постоянно-токов режим

$U_{BB} = 400\text{mV} = 0,4\text{V} < 0,7\text{V}$ 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}

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

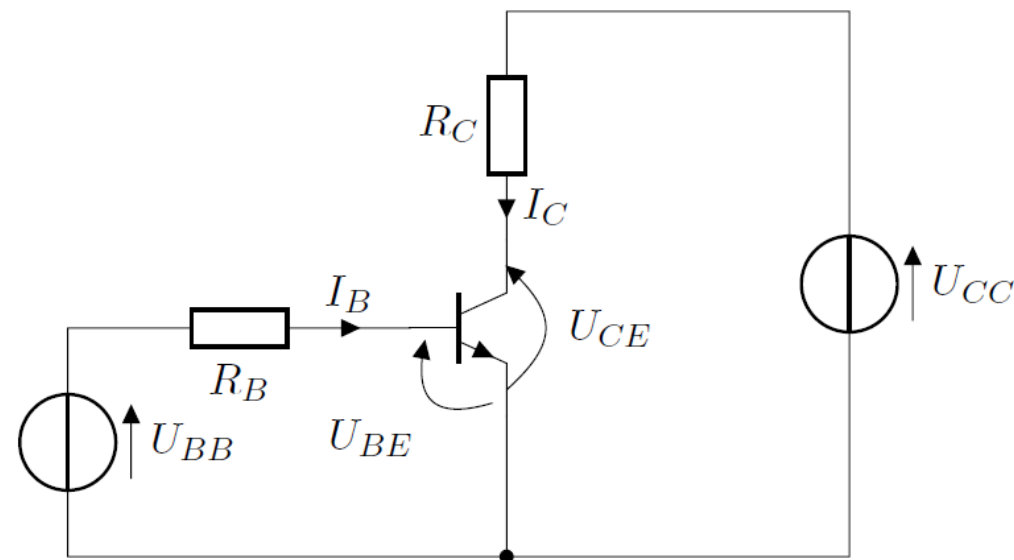
$$I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C} \quad I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{U_{CC}}{R_C \beta}$$

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

$I_B < I_{Bsat}$ – **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}

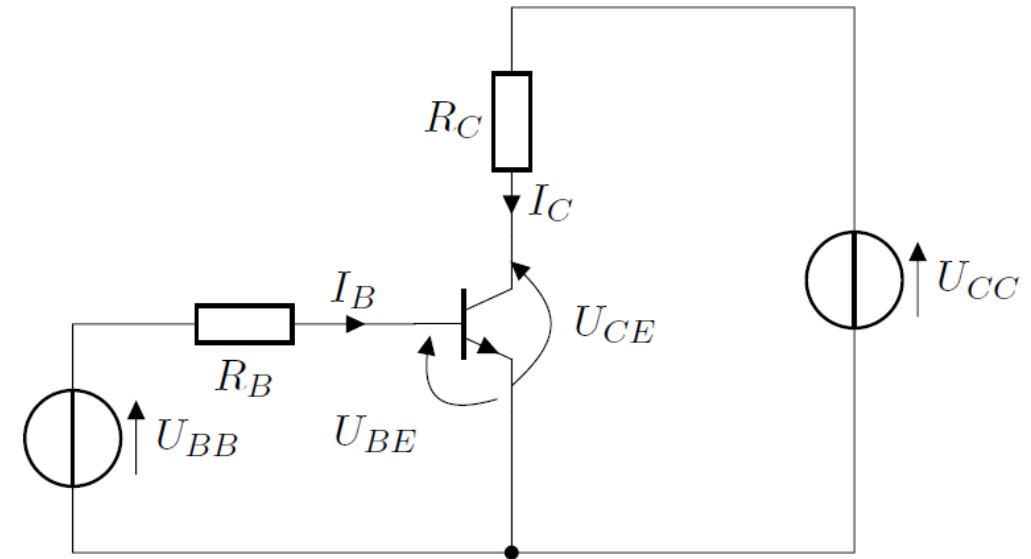
$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{4.7 - 0.7}{10 \cdot 10^3} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0,4 \text{ mA}$$

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

$I_B > I_{Bsat}$ – **Насищане**

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

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



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

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

$$\beta = 60$$

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

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

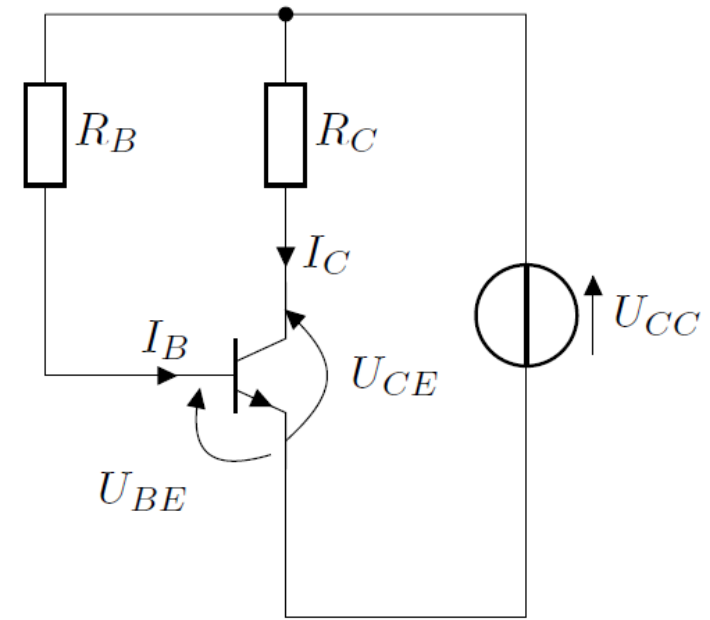
$$U_{CC} = I_B \cdot R_B + U_{BE}$$

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

$I_B > I_{Bsat} \therefore$ 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

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

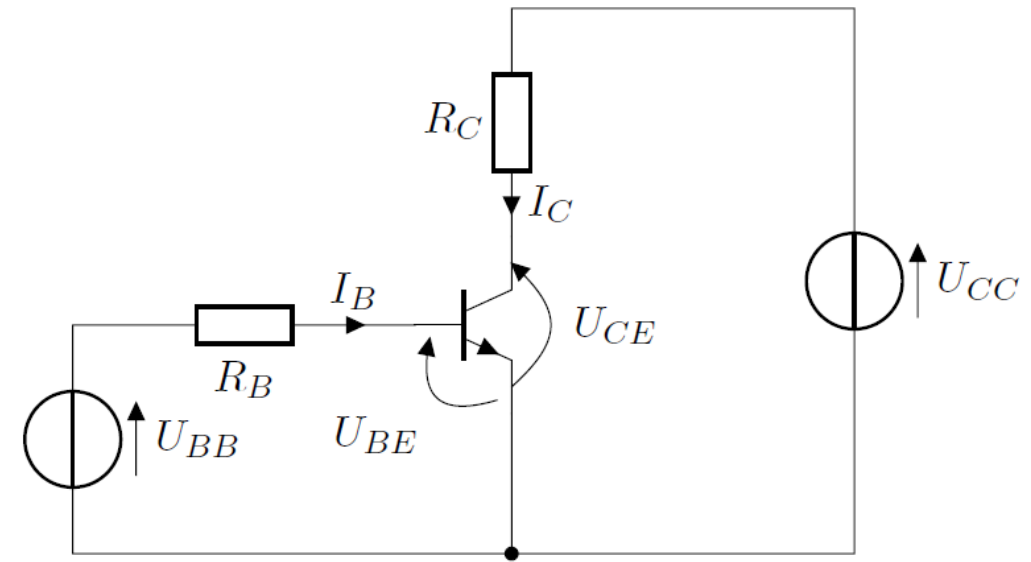
Условие за насищане $I_B > I_{Bsat}$

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

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

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

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



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

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

$$R_{Bmin} = ?$$

Задачи за постоянно-токов режим

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

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

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

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

$$U_E = I_E \cdot R_E$$

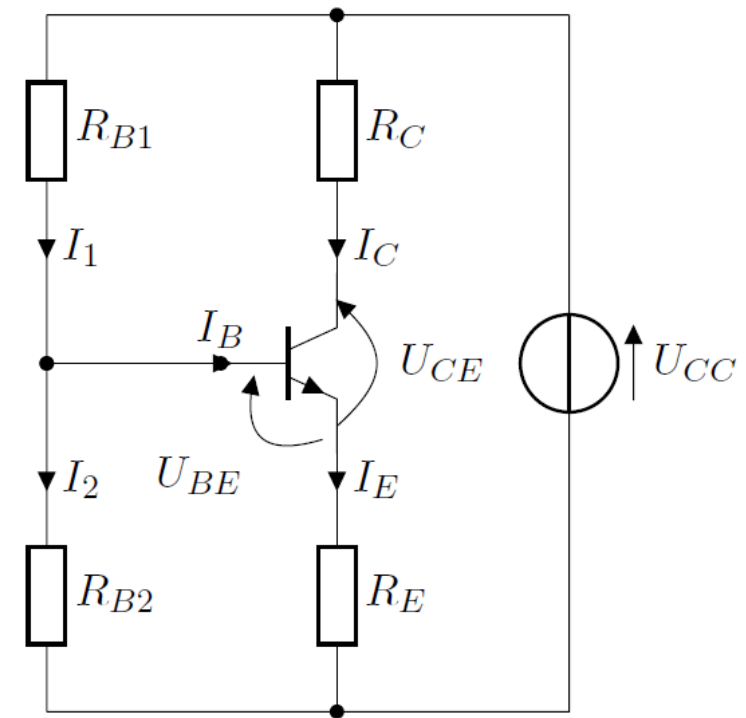
$$I_E = \frac{1}{1 \cdot 10^3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

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

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

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

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



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

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

$$\beta = 100$$

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

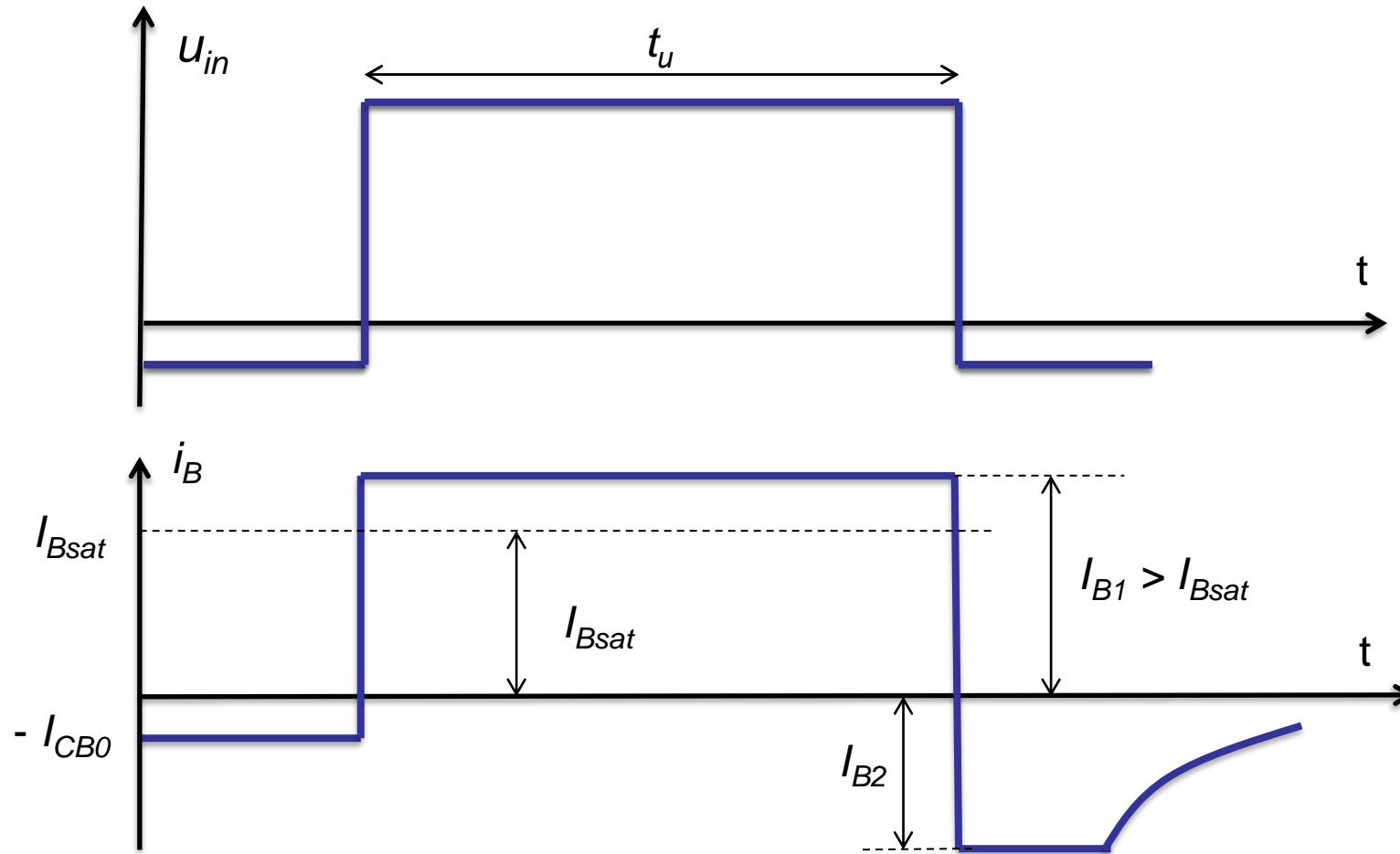
Бързодействие на ключ с биполярен транзистор

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

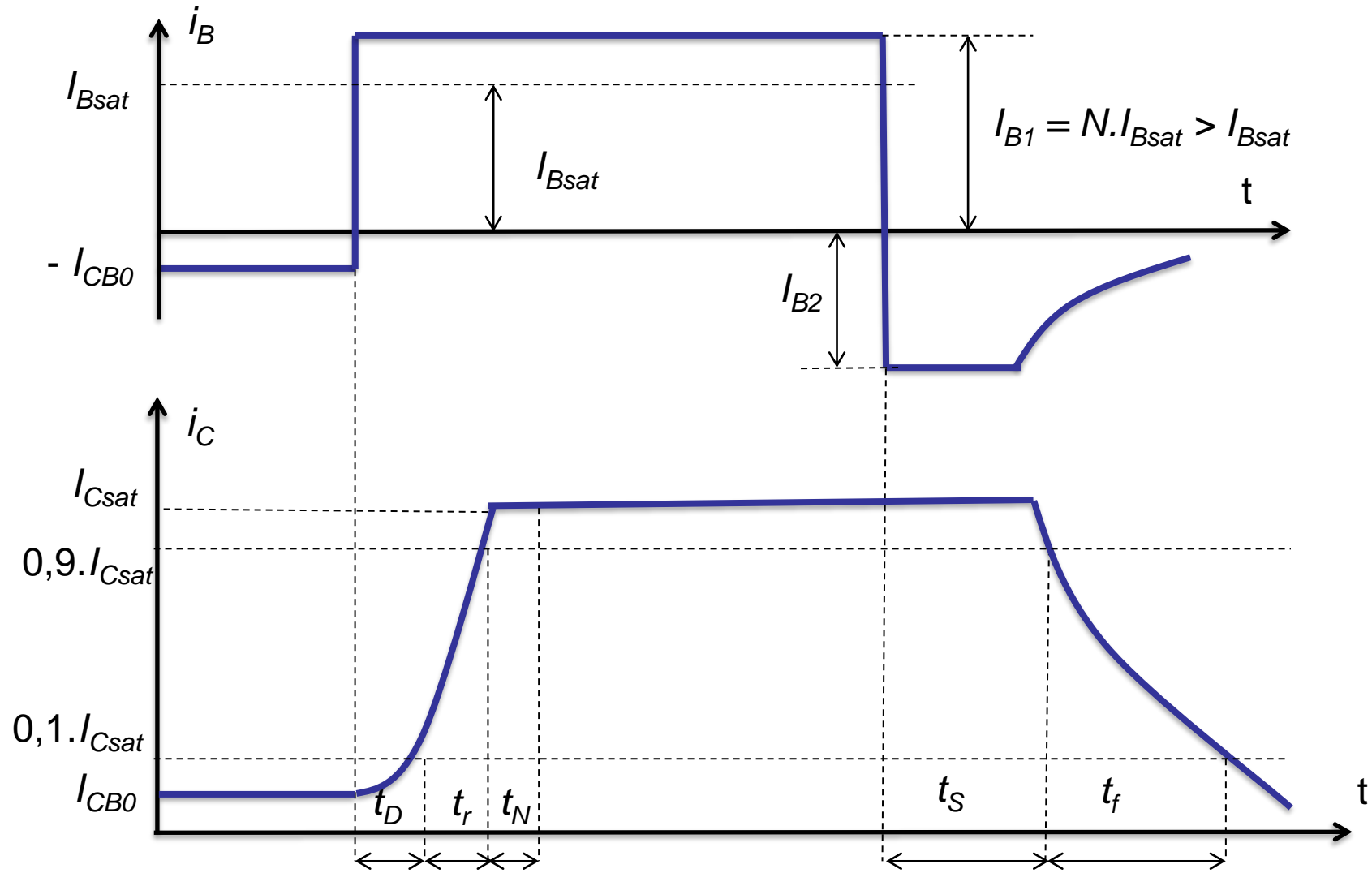
- Инерционността на процесите на пренасяне, натрупване и разнасяне на токоносителите в базата и колектора в транзистора
- Времето, необходимо за презареждане на капацитетите на преходите
- Наличието на паразитни капацитети на корпуса и индуктивности на изводите

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.

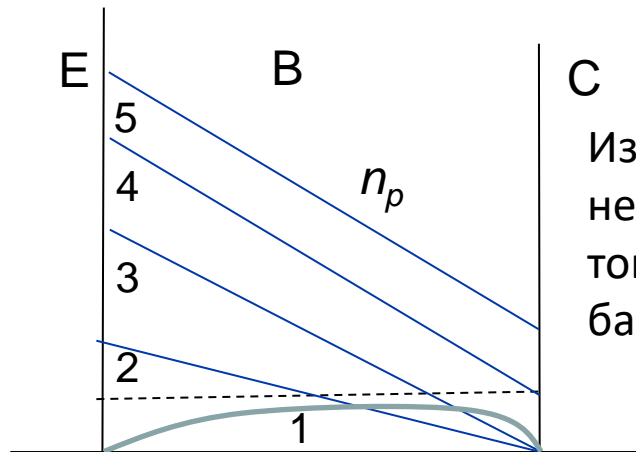
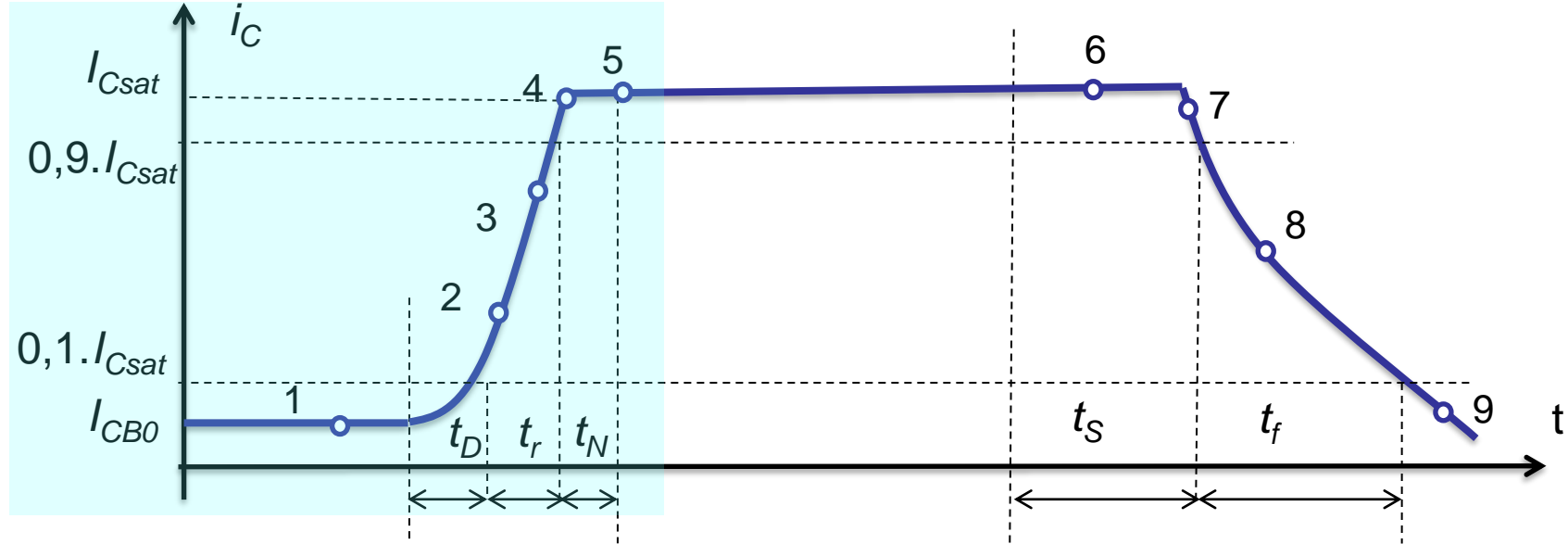
Преходни процеси при превключване



Преходни процеси при превключване



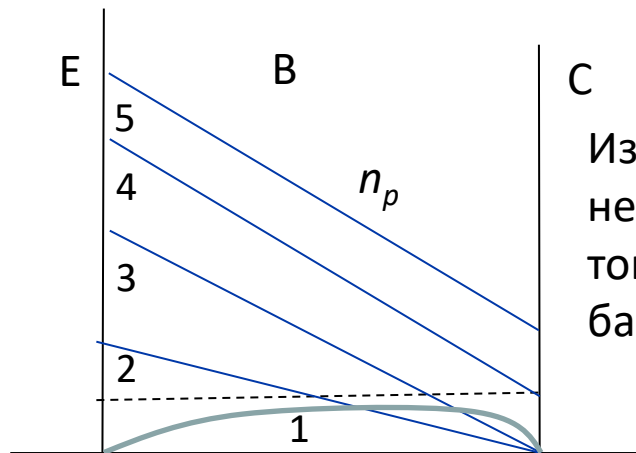
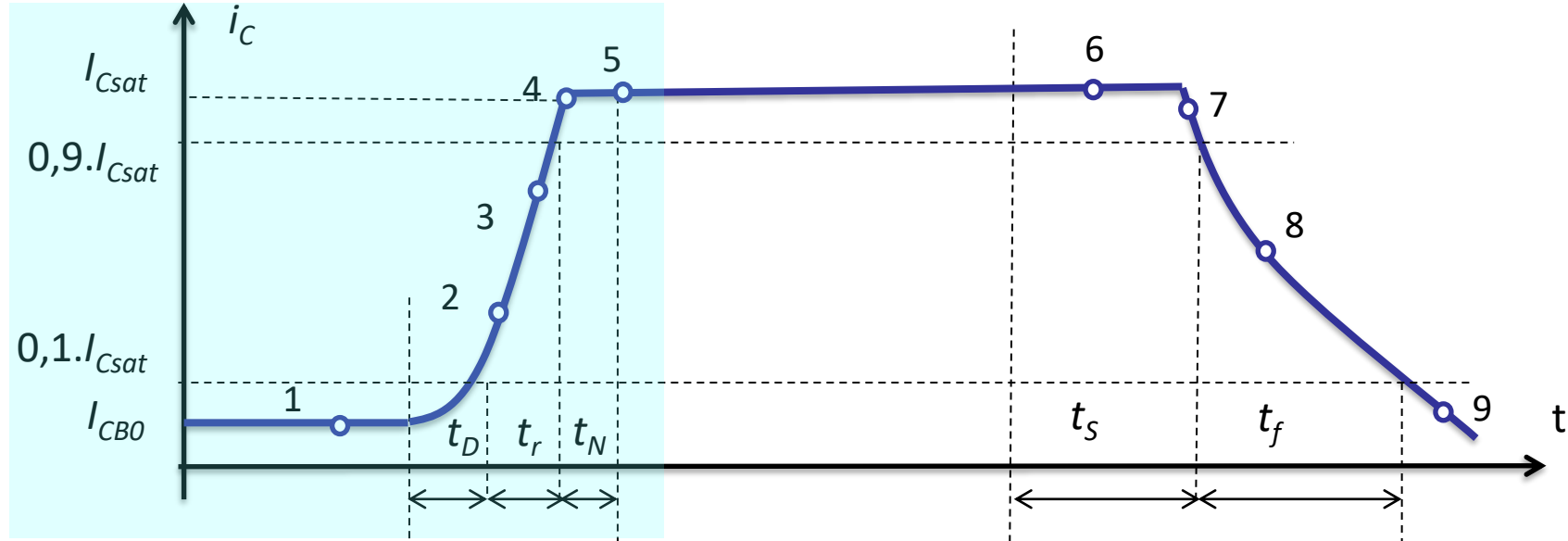
Преходни процеси при превключване



Изменение на
неосновните
токоносители в
базата

При подаване на отпушващ импулс i_B нараства скокообразно. Поради времето, необходимо за зареждане на C_E , i_C нараства бавно. Времето за достигане на i_C до 10% от I_{csat} се нарича **време на закъснение** t_D .

Преходни процеси при превключване

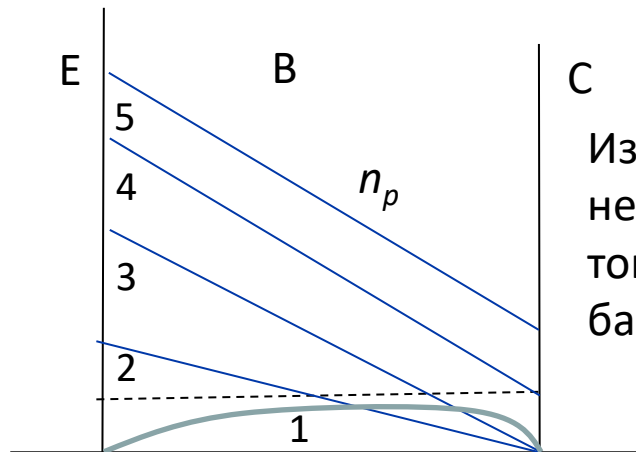
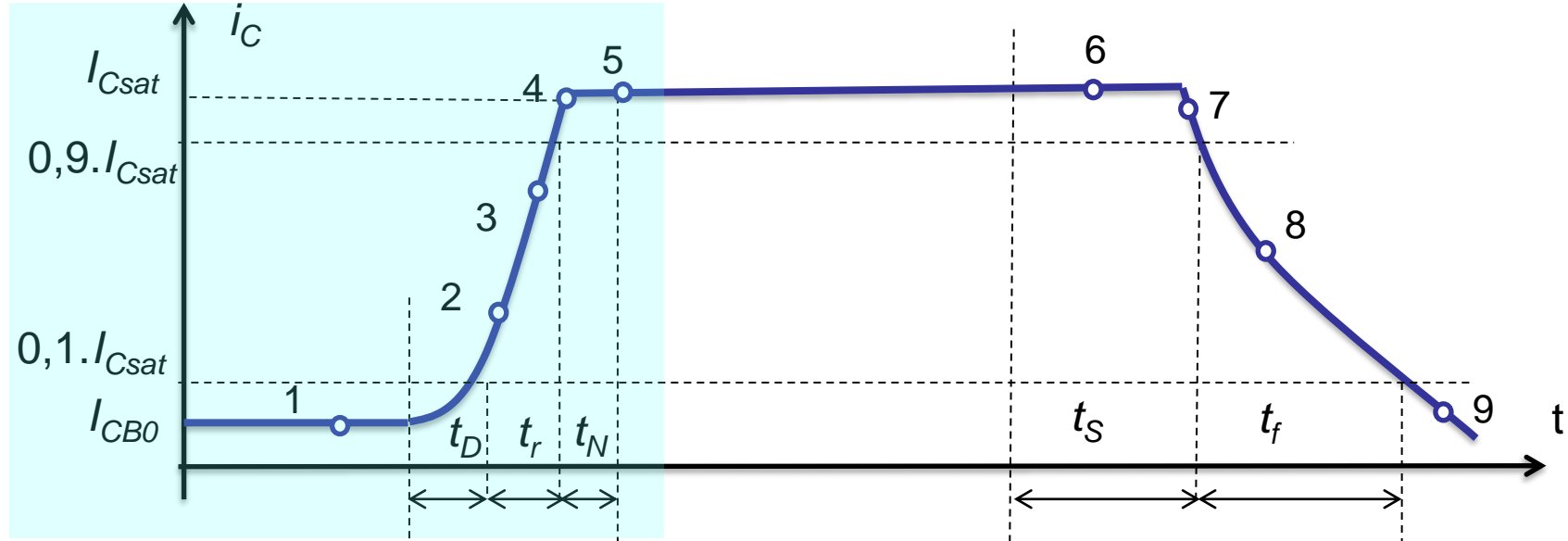


Изменение на
неосновните
токоносители в
базата

Времето за достигане на i_C от 10% до 90% от I_{csat} се нарича **време на нарастване** t_r .

Транзисторът работи в активен режим. Тук влияе инерционността на токоносителите и времето за презареждане на C_C .

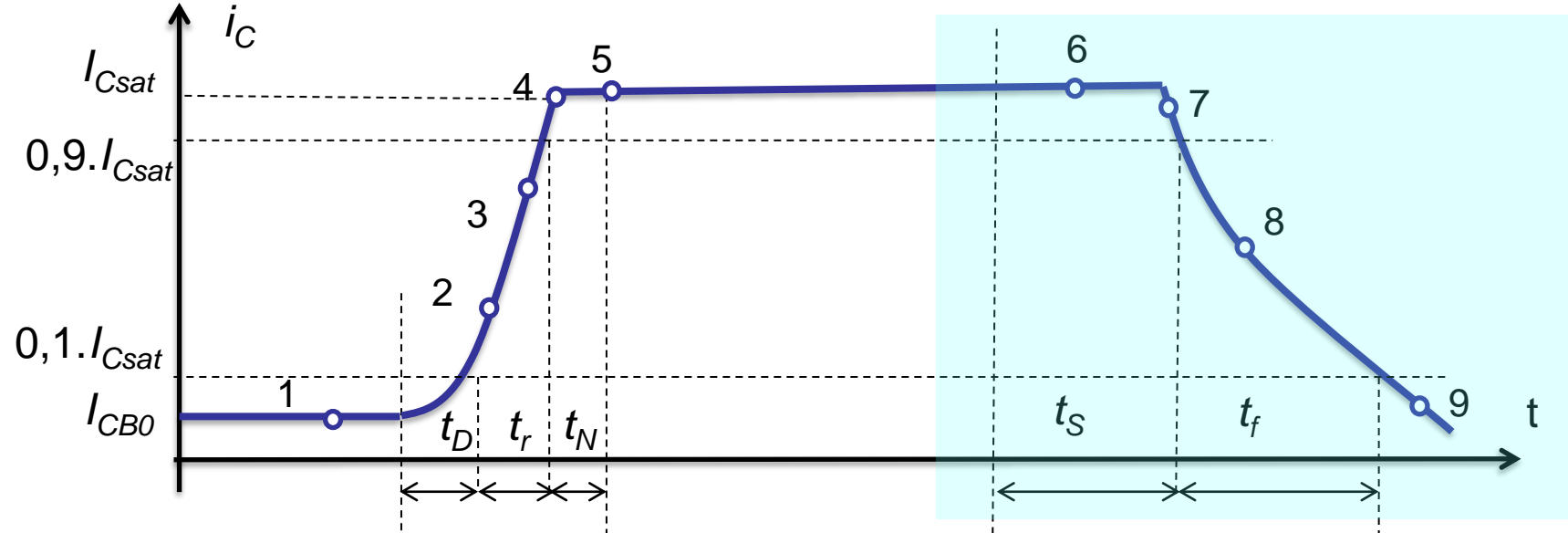
Преходни процеси при превключване



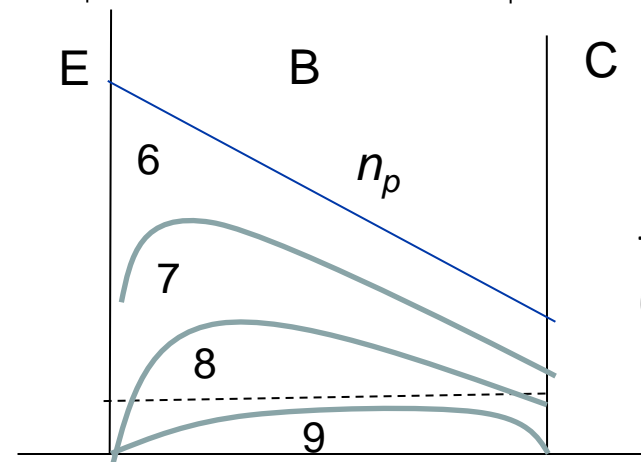
Изменение на неосновните токоносители в базата

При навлизане на транзистора в насищане, i_C достига I_{Csat} , но натрупването на токоносителите продължава в зависимост от степента на насищане N за **време за натрупване** t_N , с което преходният процес при включване завършва.

Преходни процеси при превключване

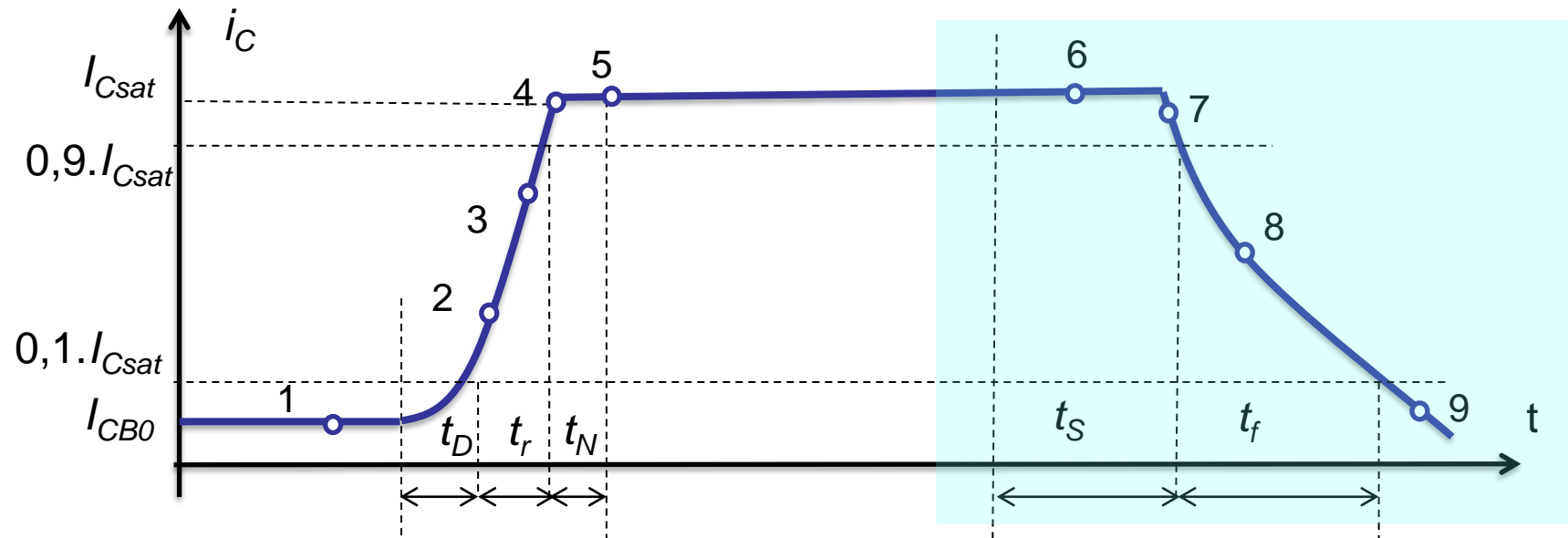


При подаване на запущащ импулс i_B сменя знака си. Започва разнасяне на натрупаните токоносителите, но $i_C = I_{Csat}$.
Дефинира се **време за разнасяне на токоносителите** t_S , за което i_C спада до 90% от I_{Csat} .

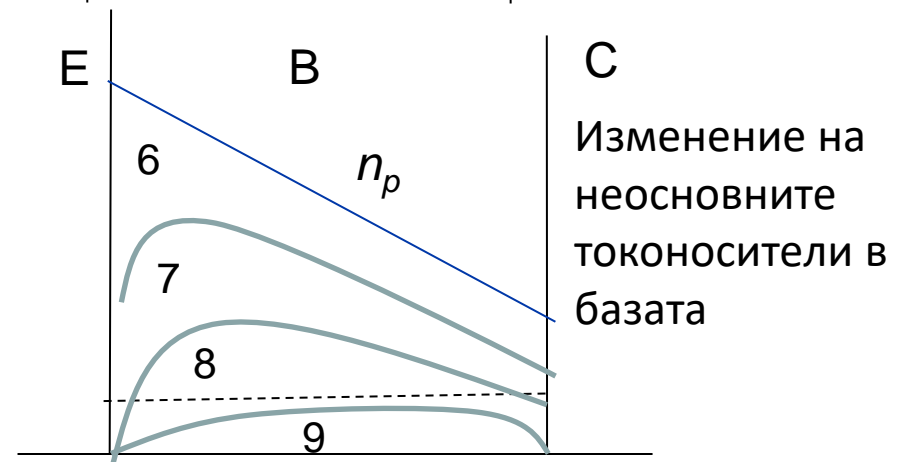


Изменение на неосновните токоносителите в базата

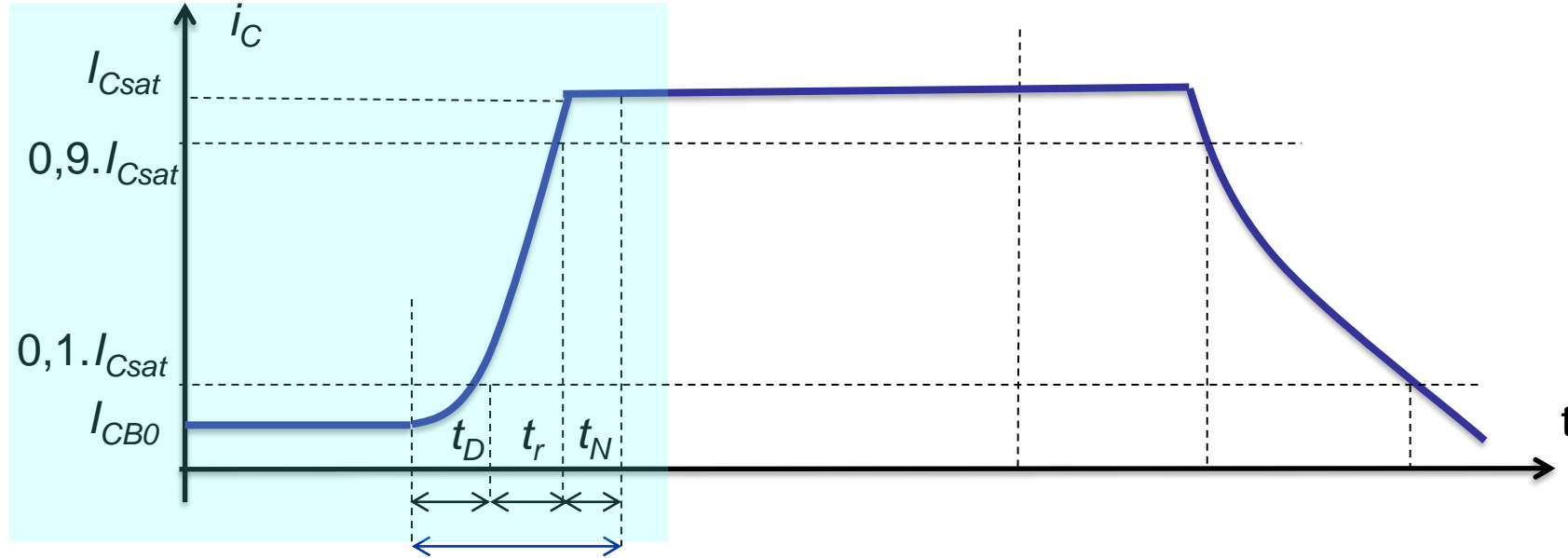
Преходни процеси при превключване



След t_s колекторният ток започва да спада. Дефинира се **време за спадане** t_f , за което i_C спада от 90% до 10% от I_{csat} , където се приема, че транзисторът се запушва.



Импулсни параметри



$$t_{ON} = t_D + t_r + t_N$$

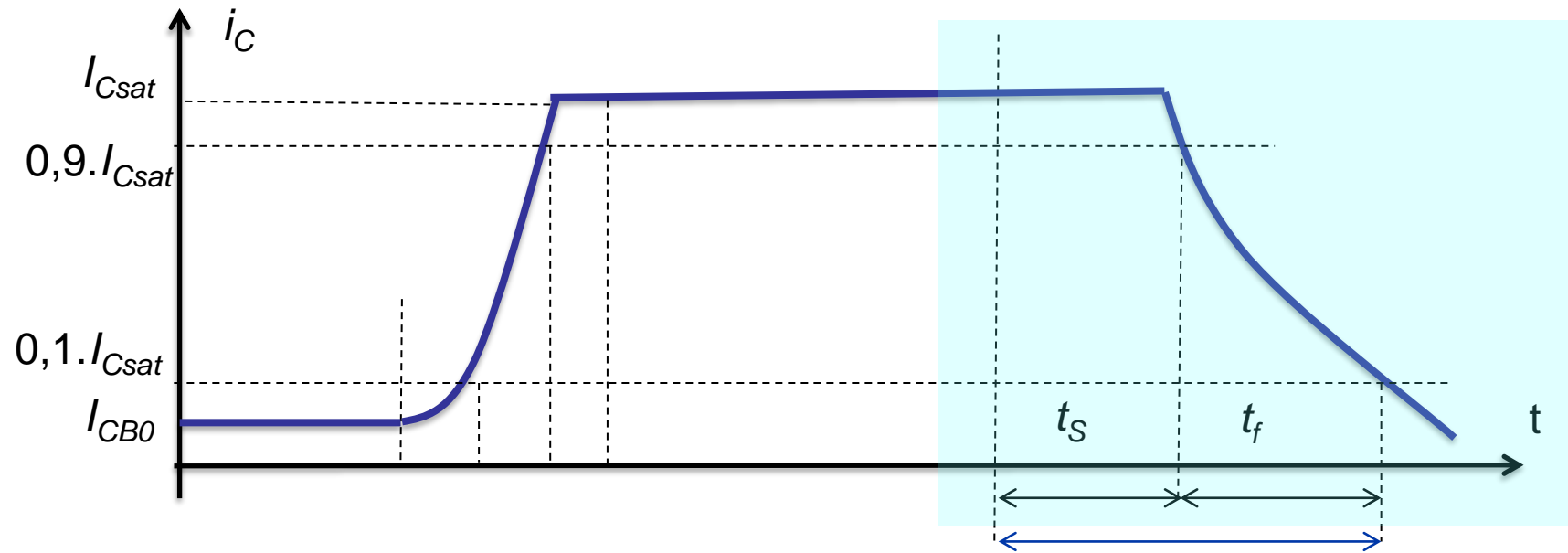
t_{ON} – време на включване

t_D – време на закъснение – времето от подаване на отпушващ импулс до достигане на $i_C = 0,1 \cdot I_{Csat}$

t_r – време за нарастване – времето нарастване на i_C от $0,1 \cdot I_{Csat}$ до $0,9 \cdot I_{Csat}$

t_H – време за натрупване – времето за натрупване на токоносителите, съответстващи на $i_B = N \cdot I_{Bsat}$

Импулсни параметри



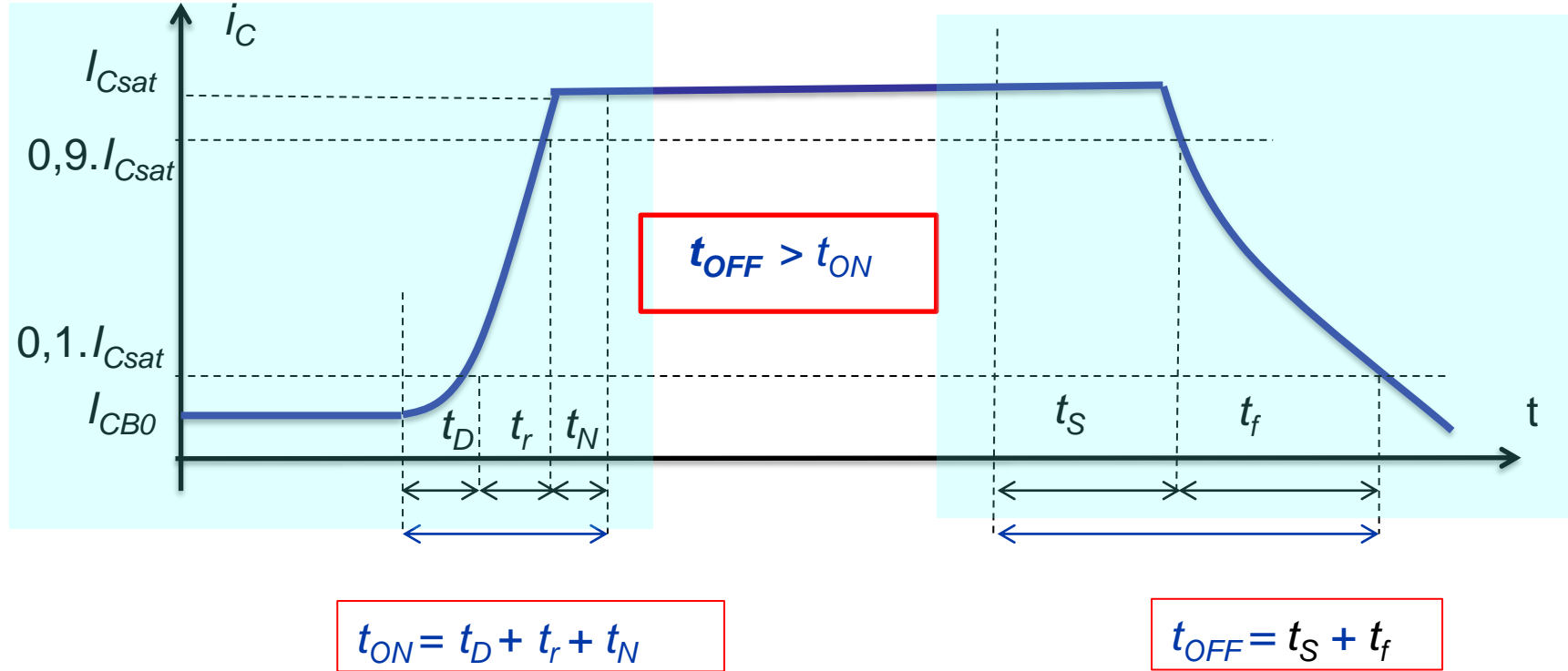
t_{OFF} – време на изключване

$$t_{OFF} = t_S + t_f$$

t_S – време на разнасяне – времето от подаване на запущващ импулс до достигане на $i_C = 0,9 \cdot I_{Csat}$

t_f – време за спадане – времето спадане на i_C от $0,9 \cdot I_{Csat}$ до $0,1 \cdot I_{Csat}$

Импулсни параметри

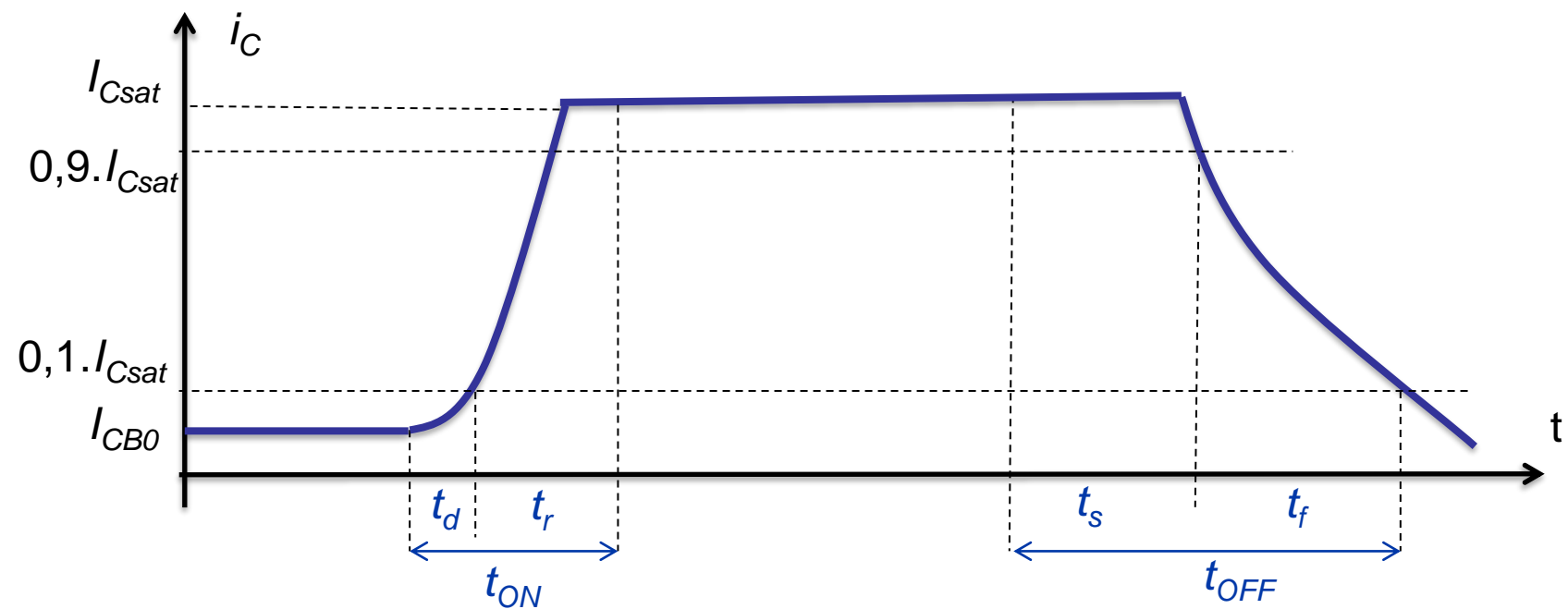


t_{ON} – време на включване

t_{OFF} – време на изключване

Времето на изключване t_{OFF} е много по-голямо от времето за включване t_{ON} .

Импульсни параметри



SWITCHING CHARACTERISTICS

| | | | | | |
|--------------|---|----------------|---|-----|----|
| Delay Time | (V _{CC} = 30 Vdc, V _{BE(off)} = -2.0 Vdc, I _C = 150 mAdc, I _{B1} = 15 mAdc) (Figure 1) | t _d | - | 10 | ns |
| Rise Time | | t _r | - | 25 | ns |
| Storage Time | (V _{CC} = 30 Vdc, I _C = 150 mAdc, I _{B1} = I _{B2} = 15 mAdc) (Figure 2) | t _s | - | 225 | ns |
| Fall Time | | t _f | - | 60 | ns |

Импульсни параметри

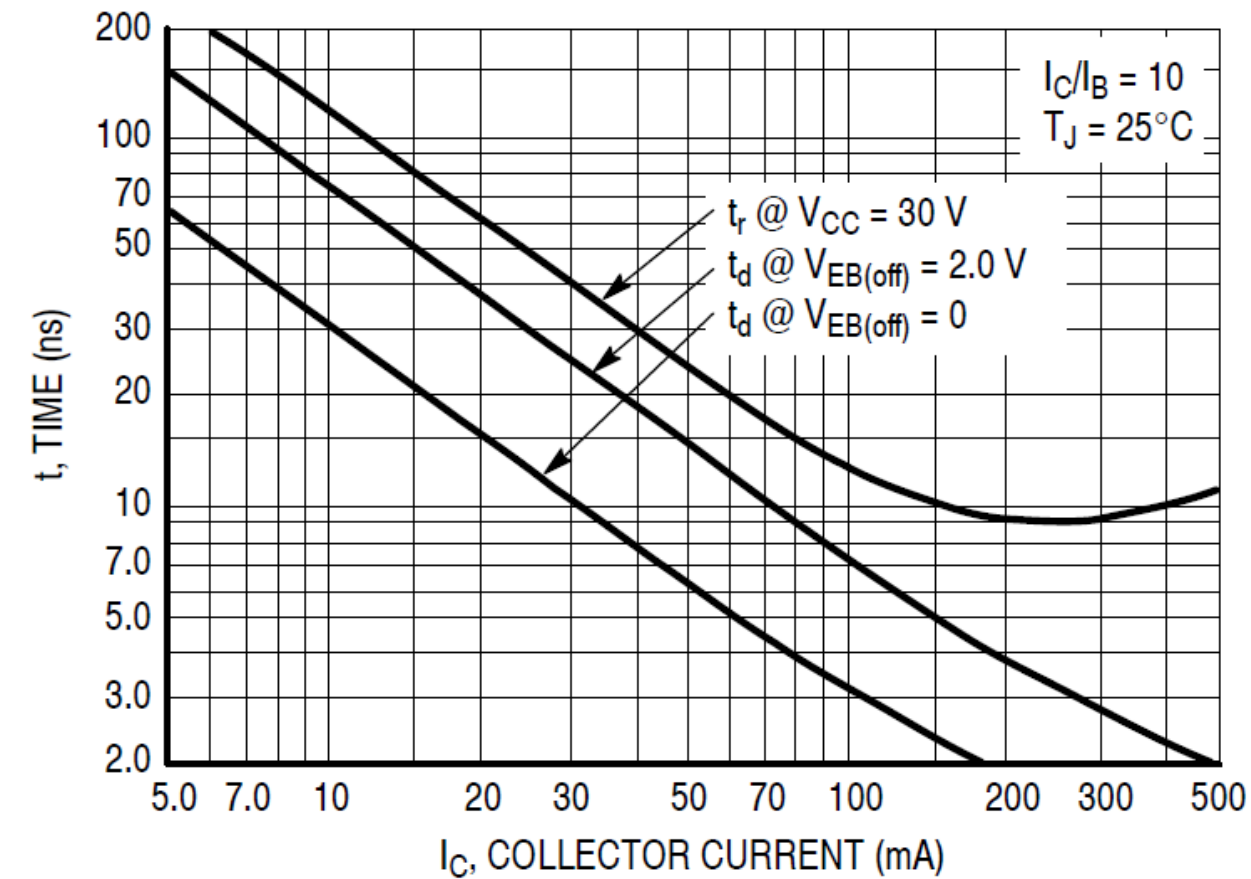


Figure 5. Turn-On Time

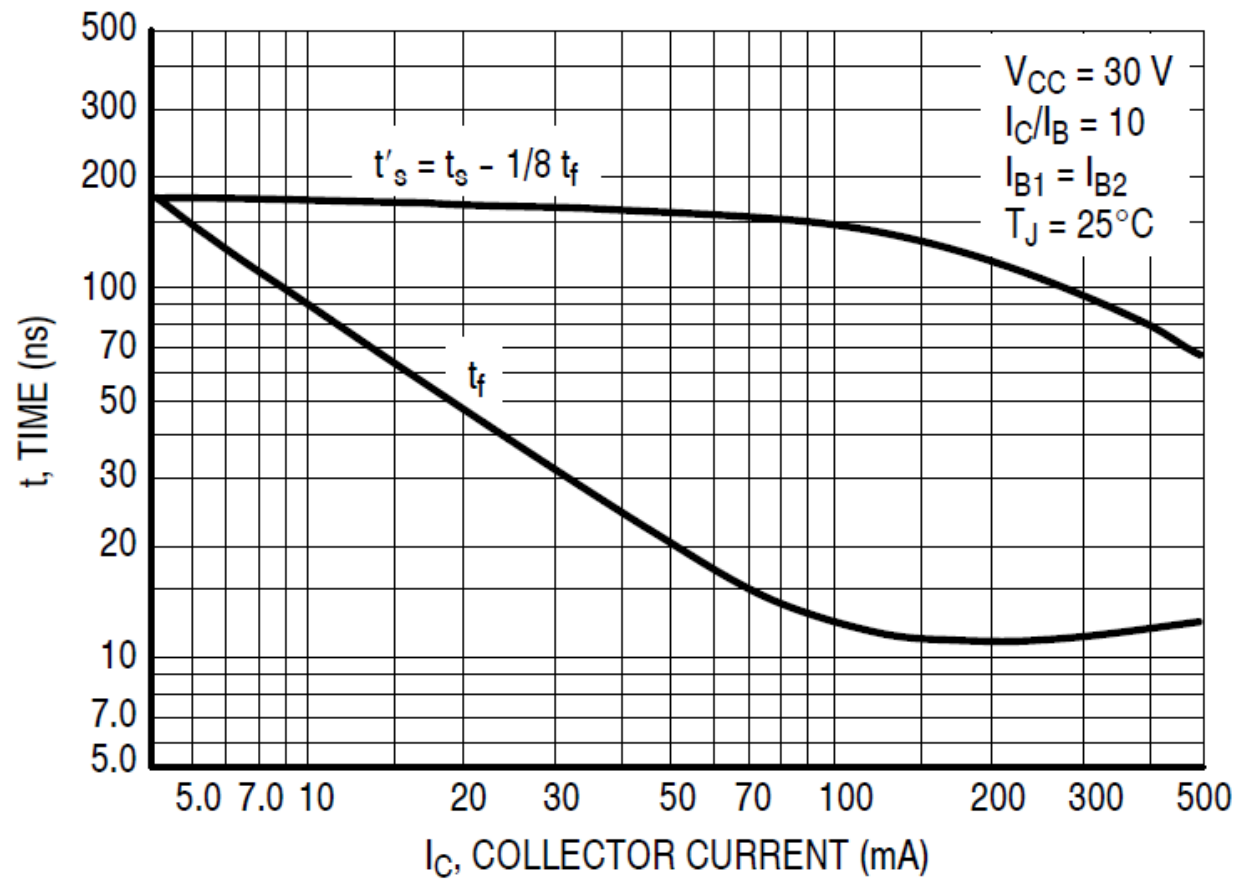


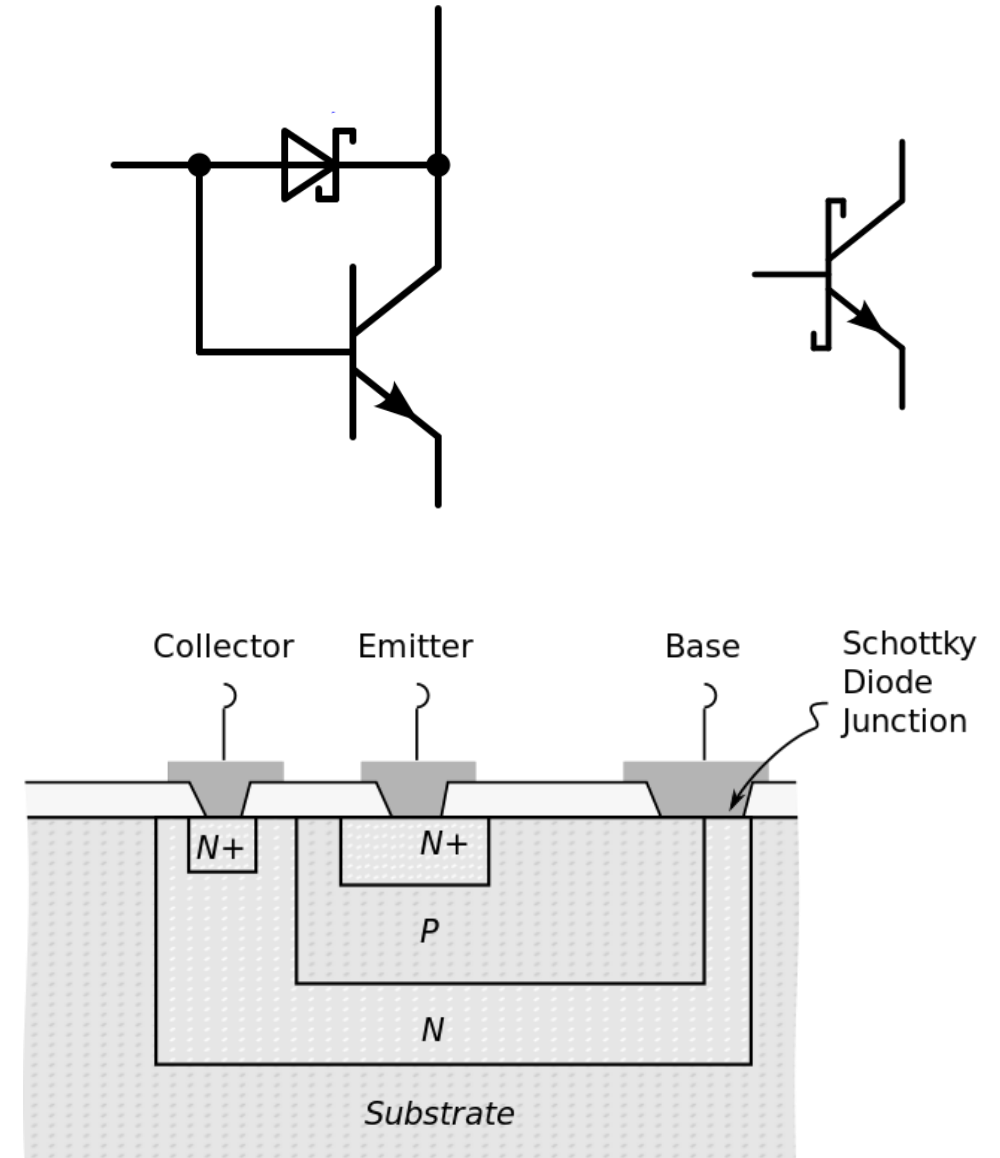
Figure 6. Turn-Off Time

Импулсни параметри

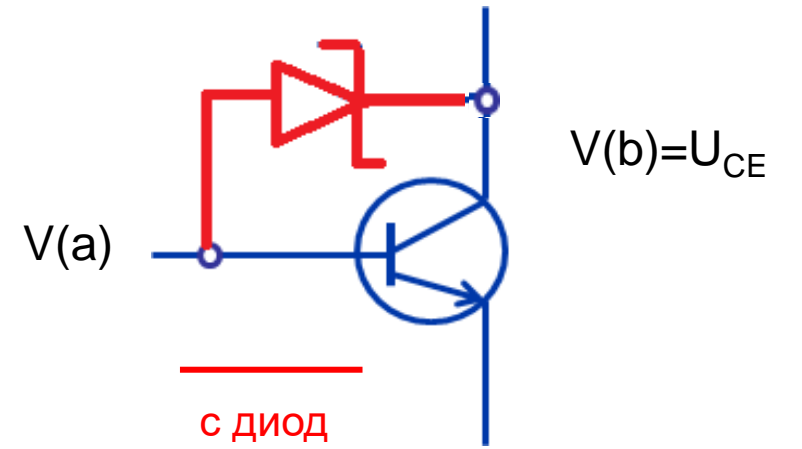
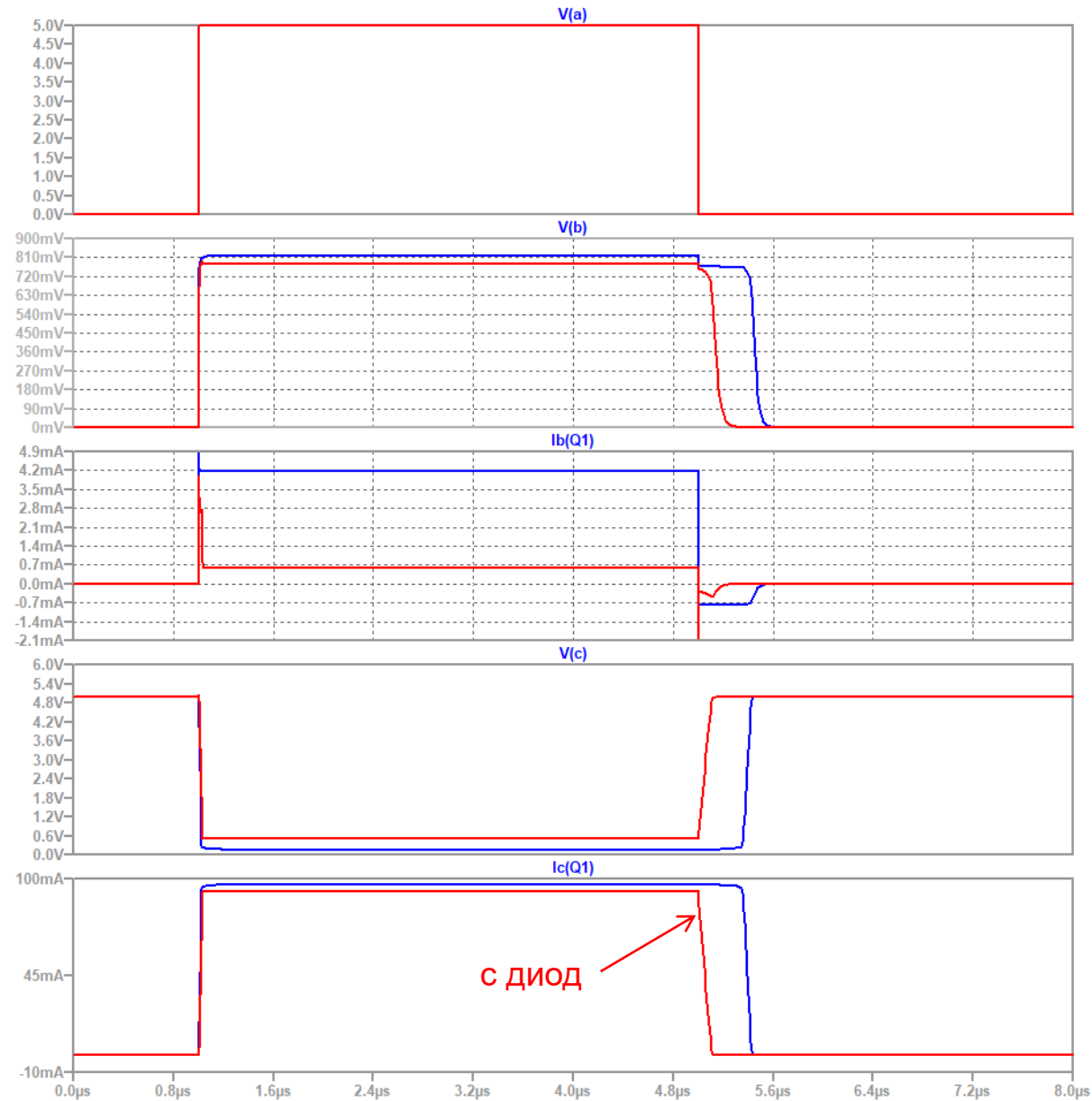
- Времената t_s и t_f зависят от I_{B2} и от честотните свойства на транзистора (геометрични размери и време на живот)
- Времето за разнасяне зависи от пълното количество носители натрупани в базата – т.е от I_{B1} (от степента на насищане N)

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.

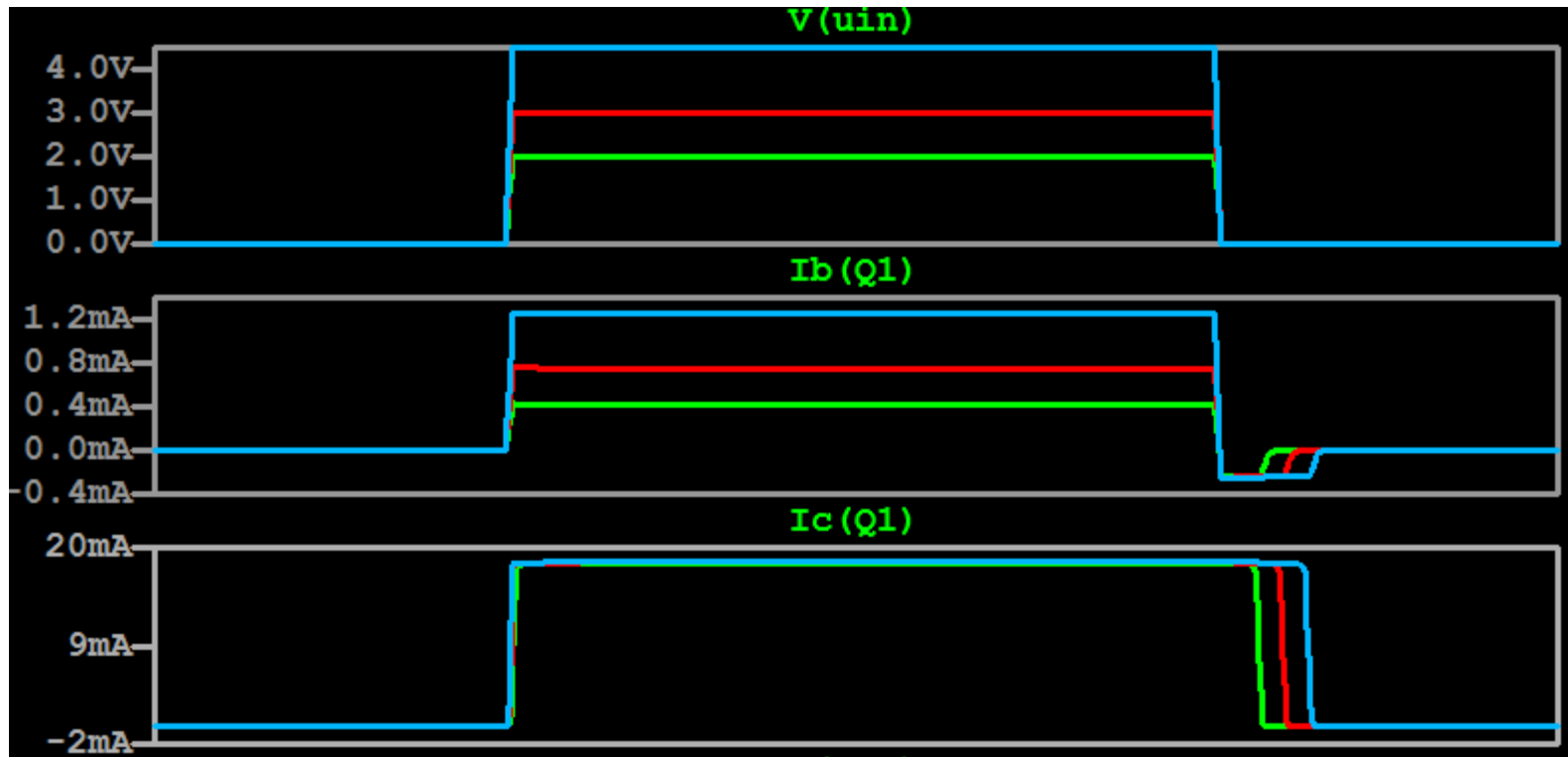
При Шотки диода липсва инжекция на неосновни токоносители и той не допринася за натрупването им при право включване.



Влияние на Шоттки диод

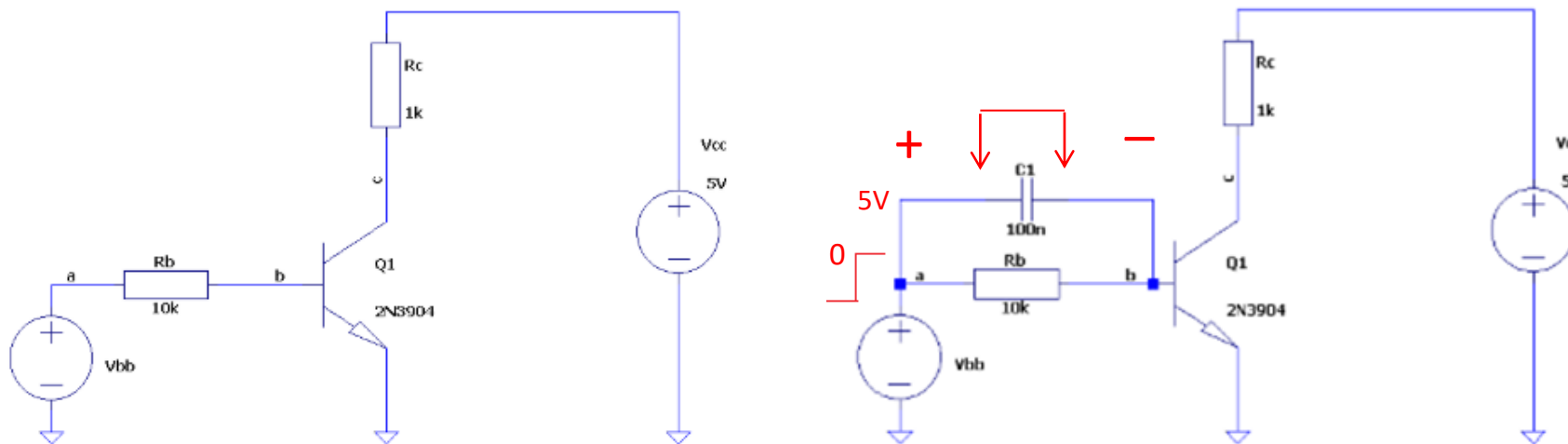


Влияние на входного напряжение



$$U_{in} \uparrow \Rightarrow I_B = \frac{U_{in} - U_{BE}}{R_B} \uparrow \quad I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{E_C}{R_C \beta} \Rightarrow N = \frac{I_B}{I_{Bsat}} \uparrow \Rightarrow t_{OFF} \uparrow$$

Влияние на кондензатор в базовата верига

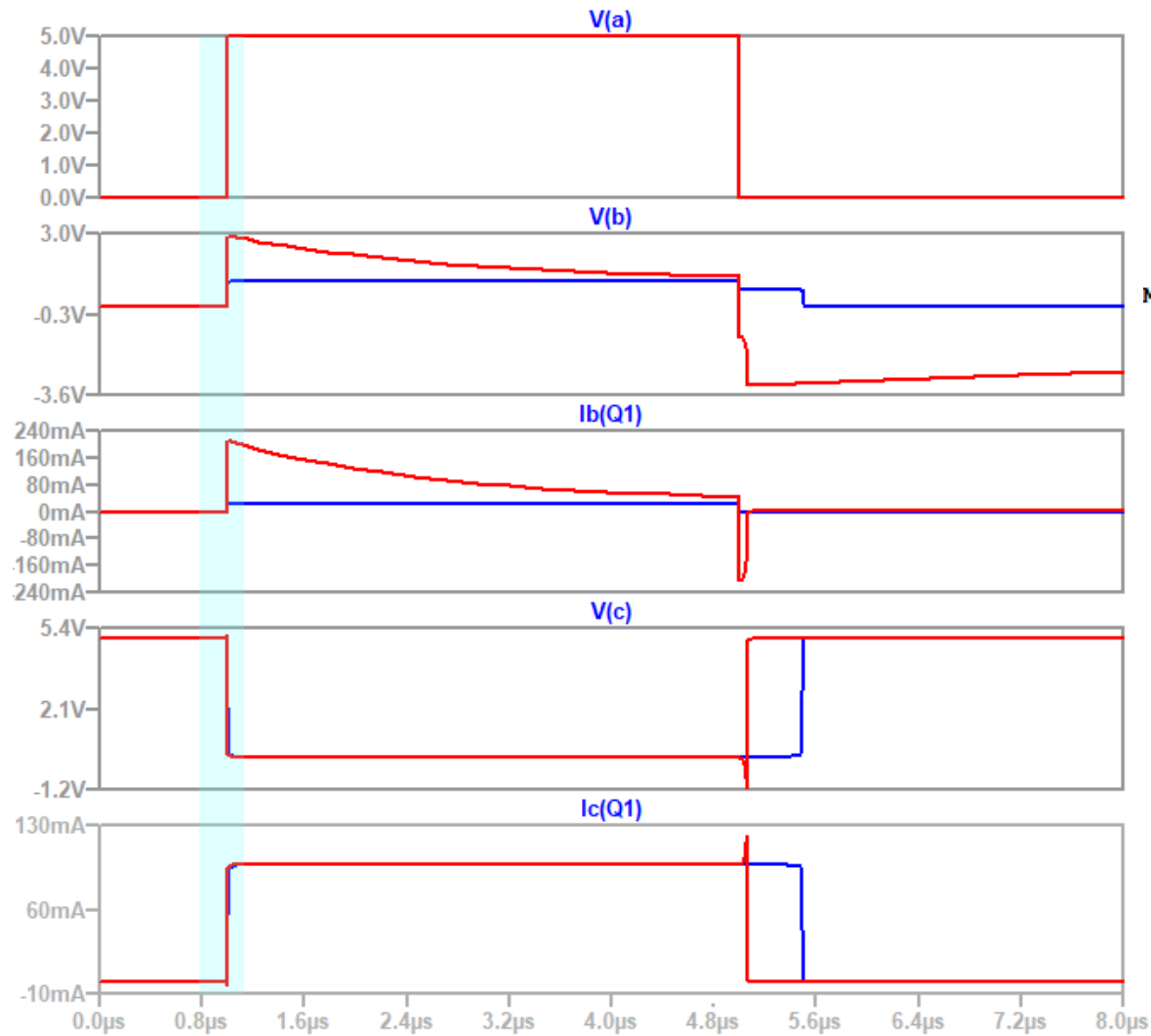


Включването на **ускоряващ кондензатор** в базовата верига на транзистора спомага за подобряване на бързодействието на електронния ключ.

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



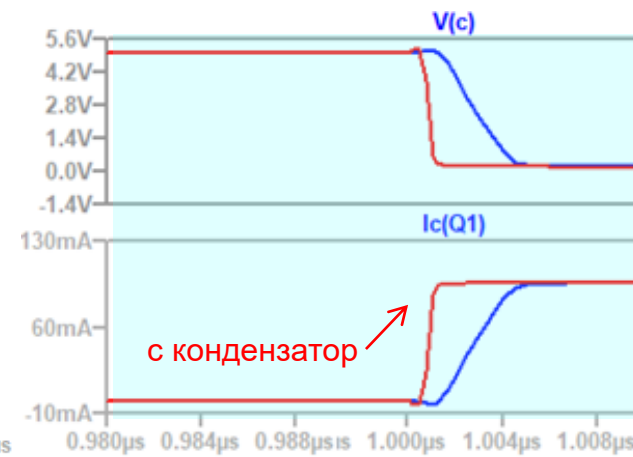
.step cb=0

.step cb=1e-07 с кондензатор

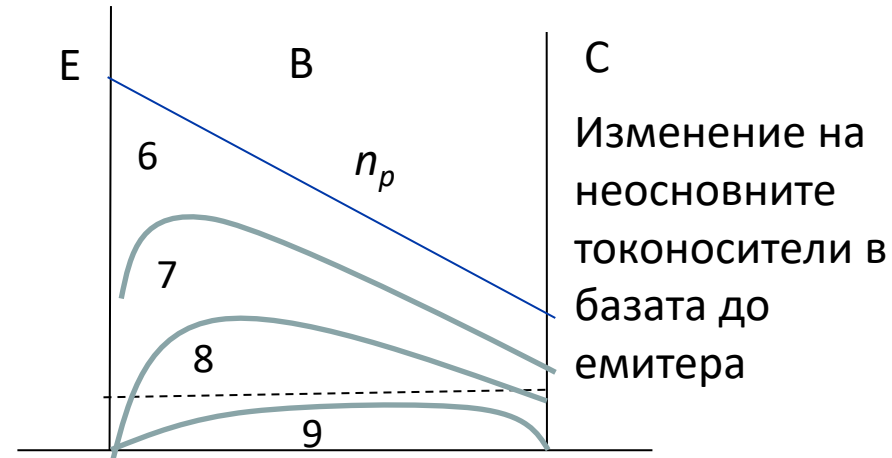
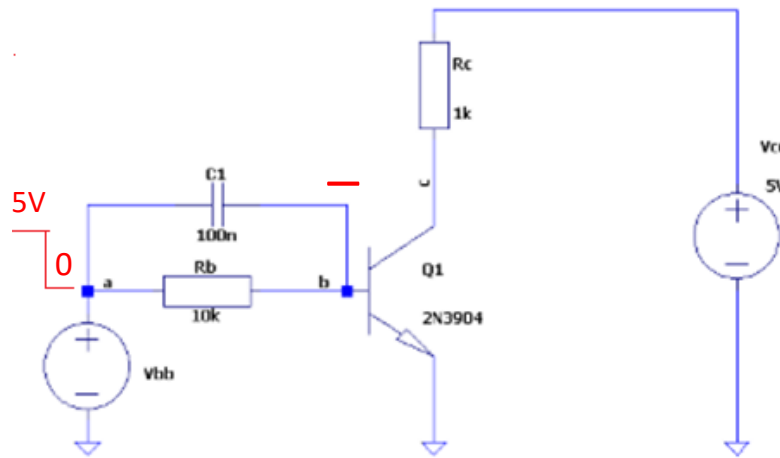
Measurement: ton

| 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}



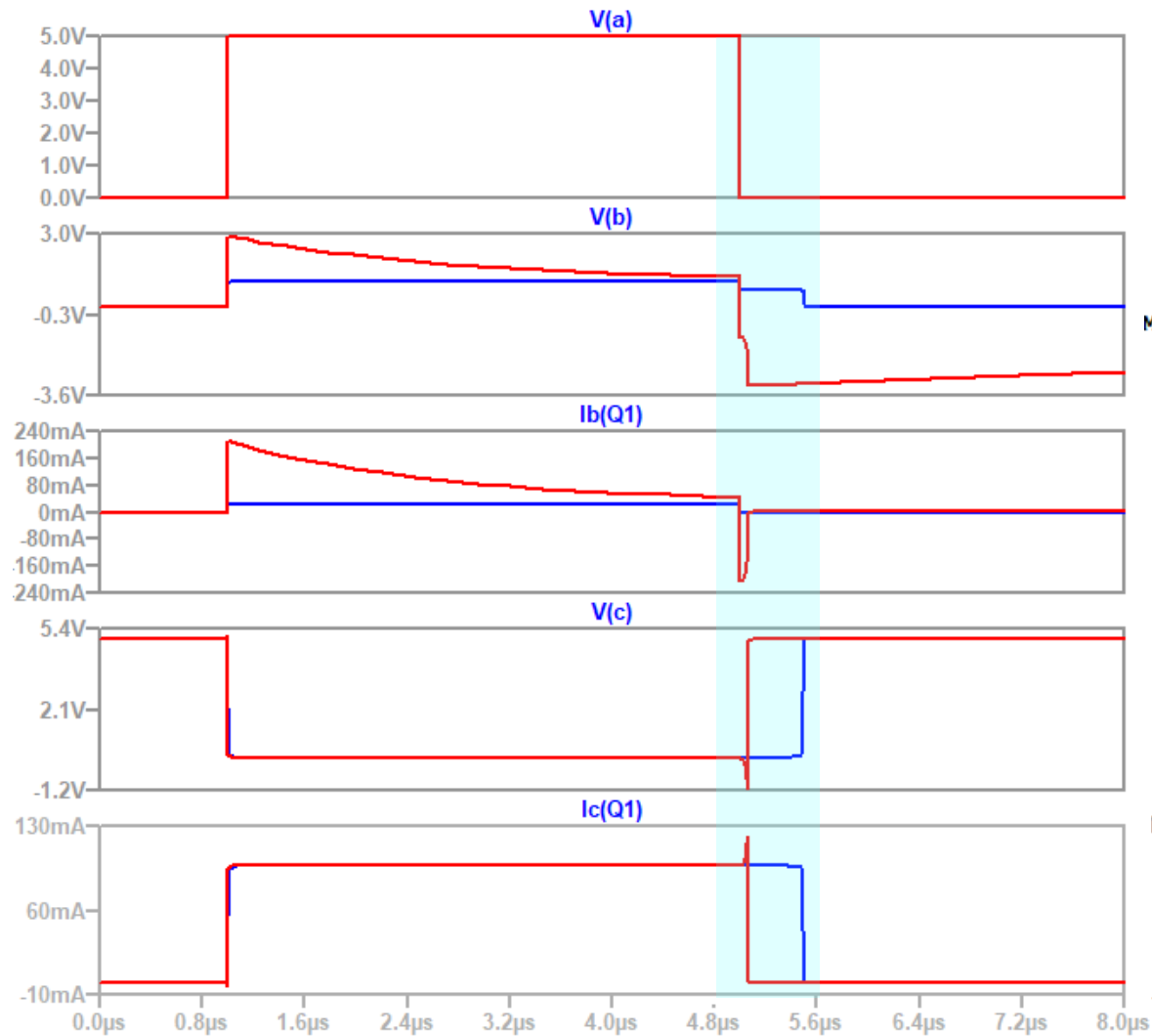
Влияние на кондензатор в базовата верига



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}

